

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Füüsika Instituut

Erik Kulu

Nanosatelliitide tehnoloogia arengutrendid

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja: Mart Noorma

Tartu 2014

SISUKORD

1	Sissejuhatus	4
2	Metoodika.....	6
3	Nanosatelliidid ja nende areng	8
3.1	Nanosatelliitide arendamise hetkeseis.....	13
3.2	Nanosatelliitide projektide omadused	16
4	Nanosatelliitide projektide seos haridusega, innovatsiooniga ja teaduse populariseerimisega	18
4.1	Nanosatelliitide hariduslikud aspektid	18
4.1.1	Hariduslikud projektid ülikoolides	20
4.1.2	Hariduslikud projektid ettevõtetes	20
4.1.3	Hariduslikud programmid kosmoseagentuurides	20
4.2	Nanosatelliitide seos innovatsiooniga ja ettevõtlikkusega	21
4.2.1	Ettevõtlikkuse kasv ülikoolides	21
4.2.2	Innovaatiline nanosatelliitide kasutamine ettevõtetes.....	22
4.2.3	Innovaatiline nanosatelliitide kasutamine kosmoseagentuurides	22
4.3	Nanosatelliitide seos teaduse populariseerimisega	23
5	Nanosatelliitide tehnoloogiatrendid, rakendused ja ärimudelid	24
5.1	Tulevikutehnoloogiad.....	24
5.2	Nanosatelliitide tulevikumissioonid ja -rakendused	26
5.3	Nanosatelliitide võrgustikud	29
5.4	Potentsiaalsed ärimudelid ja turud	30
6	Diskussioon	32
6.1	Nanosatelliitide arengut takistavad tegurid	32
6.2	Soovitused nanosatelliitide arendamiseks Eestis	34
6.3	Soovitused nanosatelliitide valdkonna arendamiseks	35

7	Kokkuvõte	37
8	Nanosatellite technology development trends	38
	Viited.....	39
	LISA 1. Küsitlused.....	48
	LISA 2. Nanosatelliitide tabel.....	51

1 SISSEJUHATUS

Nanosatelliidid on väiksed Maa tehiskaaslased massiga kuni 10 kg. Nanosatelliite arendavad nii ülikoolid, ettevõtted kui ka kosmoseagentuurid ning nende areng on viimasel kümnel aastal olnud väga kiire. Samal ajal on tekkinud ka kümneid ettevõtteid, kes müüvad nanosatelliitide komponente või pakuvad nende põhjal teenuseid.

Eesti alustas oma tudengisatelliidiprogrammi 2008. a. suvel kuupsatelliidiga ESTCube-1. Tänu tehniliselt keerukale, elektrilist päikesepurje demonstreerivale, missioonile on Eesti ka nanosatelliitide valdkonna pioneeride hulgas. Autor liitus ESTCube-1 meeskonnaga juba 2008. a. septembri alguses. Selle aja jooksul on ta muuhulgas arendanud erinevaid asendi mõõtmise ja juhtimise süsteemi komponente ning alates orbiidile saatmisest opereerinud igapäevaselt satelliiti. Lisaks osalenud ettekannetega mitmel välismaa rahvusvahelisel konverentsil [1-3] ja olnud kaasautor mitmetes ESTCube-1 publikatsioonides [4-8].

Tartu Observatoorium algatas koos partneritega jaanuaris 2013. a. Euroopa Komisjoni 7. raamprogrammi projekti NANOSAT (Utilizing the potential of NANOSATellites for the implementation of European Space Policy and space innovation), mille eesmärk on uurida kuidas saaks kasutada nanosatelliite Euroopa Liidu kosmosepoliitika elluviimisel. Pidades silmas Eesti tudengisatelliidiprogrammi huvisid jäi Tartu Observatooriumi ülesandeks kaardistada nanosatelliitide arendamise hetkeolukorda ja tuleviku perspektiive. Käesoleva töö roll selles projektis oli kaardistada nanosatelliitide arendamise hetkeolukorda ja tulevikustsenaariume.

Nüüd, aasta pärast ESTCube-1 ülessaatmist 7. mail 2013. a. Prantsuse Guajaanast, on planeerimisel Eesti tudengisatelliidiprogrammi järgmised sammud. Sealjuures on oluline jälgida nanosatelliitide tehnoloogia kiiret arengut.

Nanosatelliite kirjeldavad ka mitmed varem ilmunud ülevaateartiklid. Samas on valdkonna areng nii kiire, et juba paari aasta tagused uuringutulemused nanosatelliitidest ja nende tehnoloogiast on sisuliselt vananenud, sest nanosatelliitide arv on mitmekordistunud.

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on analüüsida projekti NANOSAT raames võimalikke tulevikustsenaariume nanosatelliitide valdkonnas ja nende põhjal anda soovitusi Eesti tudengisatelliidiprogrammi arendamiseks. Selle eesmärgi saavutamiseks on plaanis

- viia läbi mitmeosaline uuring nanosatelliitide arendamise hetkeseisust maailmas;
- uurida nanosatelliitide projektide seost kõrgharidusega, innovatsiooniga ja teaduse populariseerimisega;
- kirjeldada tehnoloogiaid, mille kiire areng on eelduseks nanosatelliitide mitmekülgseks kasutamiseks;
- kirjeldada kosmosetehnoloogia rakendusi ja ärimudeleid, mille arengut võivad nanosatelliidid olulisel määral toetada;
- koostada ja esitada kaks raportit Euroopa Komisjonile nanosatelliitide arendamisest ja potentsiaalsetest kasutusvõimalustest.

2 METOODIKA

NANOSATi projekt algas jaanuaris 2013 ja lõpeb detsembris 2014. Projektis osaleb 5 partnerit: Tartu Observatoorium, Aalborgi Ülikool Taanis, Rootsi nanosatelliitide ettevõtte Nanospace, Euroopa suuruselt kolmas kosmosefirma OHB System Saksamaalt ja koordinaatorina Eesti ettevõtte Invent Baltics. Lähtudes Tartu Observatooriumi (TO) kosmosetehnoloogia osakonna ja Eesti tudengisatelliidiprogrammi huvidest jäi TO osaks esimene töopakett pealkirjaga „Nanosatelliitide osapooled Euroopas, parimad praktikad ja potentsiaalsed ärimudelid“ (Nanosatellite actors in Europe, best practices and potential markets) ja ülesandeks kaardistada nanosatelliitide arendamise hetkeseisu ja perspektiive (Mapping current state and perspectives of nanosatellite development). Selle tulemuseks olid raportid pealkirjadega „Nanosatelliitide arendamise parimad praktikad ja seos hariduse, innovatsiooni ning kosmose populariseerimisega“ (Best practices concerning nanosatellite development: impact on education, innovation, space outreach) ja „Nanosatelliitide võimalikud kasutusala, peamised väljakutsed ja potentsiaalsed ärimudelid“ (Opportunities for nanosatellites utilization: main challenges and potential markets), mis esitati Uuringute Täidesaatvale Agentuurile (Research Executive Agency, REA) veebruaris 2014.

Nanosatelliitide hetkeolukorra ja perspektiivide kaardistamist alustati avalike satelliitide ja raketistartide andmebaaside [9-14] läbiuurimisega. Halvimal juhul leidis seal ainult nanosatelliidi nimi, aga parimal juhul ka olulised parameetrid (organisatsioon, mass, üles saatmise aasta ja missioon). Nimede teadasaamine võimaldas hakata otsima detailsemat informatsiooni konkreetsete projektide kohta, sest kuskil mujal ei leidu suurt pidevalt uuendatavat nanosatelliitide nimekirja. Seejärel vaadati läbi kõik leitud nanosatelliitidega seotud artiklid, konverentside materjalid, uudised, kodulehed ning juba olemasolevad uuringud [15-34].

Uuringu põhjal moodustati andmebaas 572 nanosatelliidist koos nime, suuruse või massiga, riigiga, organisatsiooni nime ja tüübiga, projekti juhi nime ja kontaktiga, üles saatmise aastaga, eksperimendi ja missiooniga ning veebilehe aadressiga. Andmebaasis olevad 572 nanosatelliiti on kas juba üles saadetud, aktiivselt arendamisel või mitteedukalt lõpetatud. Loodud andmebaas ei sisalda projekte, mis ei ole jõudnud ideefaasist kaugemale, kuigi seda piiri on

mõnikord keeruline määrata, sest avalikku informatsiooni on enamuste projektide kohta väga vähe ja tegelikkuses võib arendamisfaasis olevate satelliitide hulk olla suurem.

Nanosatelliitide projektide senist mõju haridusele, innovatsioonile ja teaduse populariseerimisele on ka analüüsitud publikatsioonides [15-34]. Mitmete varem uurimata aspektide kvalitatiivseks ja kvantitatiivseks uurimiseks viidi lisaks läbi veebiküsitlus, mis saadeti laiali 191 projektijuhile, kelle kontaktandmeid olid kogutud avalikest allikatest. Veebiküsitlusele, mis koosnes 31 küsimusest, vastas 17 organisatsiooni; infot anti 29 nanosatelliidi kohta. Küsimustik on esitatud lisas 1. Küsimused valiti sellised, sest nad annavad arusaama kuidas ja miks nanosatelliite arendatakse ning neid vastuseid ei ole üldjuhul võimalik leida muudest allikatest, näiteks kodulehelt või publikatsioonidest.

Lisaks veebiküsitlusele viidi uuringut läbi ka intervjuude vormis kahel konverentsil: 5. Euroopa Kuupsatelliitide Sümpoosiumil (5th European CubeSat Symposium), mis toimus Brüsselis 3. – 5. juunil 2013. Autor osales veel 64ndal Rahvusvahelisel Astronautika Kongressil (64th International Astronautical Congress), mis toimus Pekingis 23. – 27. septembril 2013. Intervjuu vormis saadi küsimustikule 13 täiendavat vastust. Lisaks kogus autor konverentsidel osaledes palju täiendavat informatsiooni uute projektide kohta.

Veebiküsitluse tulemuste tõlgendamiseks ja sisulisemaks aruteluks viidi läbi kaks NANOSATI tööseminari. Esimene toimus 7. novembril 2013 Kopenhaagenis, mille teemaks oli „Parimate nanosatelliitide arendamiste kogemuste vahetamine, seos hariduse, innovatsiooni ja teaduse populariseerimisega“ (Exchange of best practices, impact on education, innovation and space outreach) ning kus osales üle 30 inimese kosmoseagentuuridest, ülikoolidest ja ettevõtetest. Pärast töötuba saadeti laiali ka tagasisideküsitlus, mille võib leida lisas 1 ja sellele vastas 9 inimest. Teine tööseminar toimus 19. märtsil 2014 Bremenis ja seal osales 43 inimest 10 riigist. Diskussioonid transkribeeriti ja neid kasutati analüüsis.

Küsitluste, töötubade arutelude ja kirjanduse põhjal kirjeldati ära suurimad probleemid, mis pidurdavad nanosatelliitide mitmekülgset kasutamist. Uuringu tulemuste põhjal kirjeldati tehnoloogiaid, mille areng on aluseks nanosatelliitide võimekuse jätkuvale kasvule (enabling technologies) järgmise 20 aasta jooksul. Nanosatelliitide võimekuse kasv tekitab omakorda potentsiaalseid ärimudeleid, mis on seotud nanosatelliitide arendamise ja kasutamisega.

3 NANOSATELLIIDID JA NENDE ARENG

Nanosatelliidid on üldlevinud klassifikatsiooni järgi satelliidid massiga 1 kg kuni 10 kg. Satelliitide kontekstis ei oma nano ja mikro suurusjärgulist seost SI-süsteemi eesliidetega. Tavaliste satelliitide mass on suurem kui 500 kg. Kõiki satelliite alla 500 kg nimetatakse ka väikesteks satelliitideks. Minisatelliidi mass on 100 kg – 500 kg ja mikrosatelliidi mass on vahemikus 10 kg – 100 kg. [35]



Joonis 1. Ühe ühikuline kuupsatelliit ESTCube-1

Selles uuringus loetakse nanosatelliitide hulka kõik kuupsatelliitide (*CubeSat*) standardit [36] ärgivad satelliidid. Kuupsatelliit 1U (ühe ühikuline) tähendab tehiskaaslast mõõtmetega 10 cm x 10 cm x 11,35 cm (joonis 1) ja massiga kuni 1,33 kg. Kuupsatelliidi 2U mõõtmed on 10 cm x 10 cm x 22,70 cm ja mass kuni 2,66 kg ehk 2 korda suuremad. [36] Arendamisel on ka mitmeid 6U kuupsatelliite ja plaanitakse 12U ja 24U kasutuselevõttu.

Nagu igat satelliiti võib ka nanosatelliiti jagada kaheks põhiliseks osaks: satelliidi tööks vajalikud alamsüsteemid (satellite bus) ja eksperimendiga seotud kasulik koormis (payload). Nanosatelliitide tööks vajalike alamsüsteemide jaotus on valdavalt järgmine.

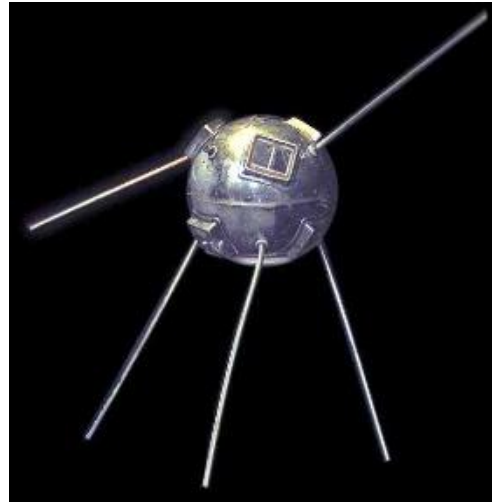
1. Asendi määramise ja juhtimise alamsüsteem (Attitude Determination and Control Subsystem, ADCS), mille ülesandeks on määrata satelliidi orientatsioon orbiidil, kasutades näiteks magnetomeetreid, päikeseandureid, pöörlemiskiiruse andureid, tähesensoreid, ja muuta seda orientatsiooni kasutades elektromagnetpoole või hoorattaid.
2. Käsu- ja andmehalduse alamsüsteem (Command and Data Handling Subsystem, CDHS) ehk pardaarvuti, mille ülesandeks on koordineerida teiste alamsüsteemide tööd ja koguda andmeid.
3. Elektritoite alamsüsteem (Electrical Power Subsystem, EPS), mille ülesandeks on koguda päikesepaneelidelt elektrienergiat, salvestada seda akudes ja jagada seda teistele alamsüsteemidele.

4. Sidesüsteem (Communication Subsystem, COM), mille ülesandeks on sidepidamine satelliitside maajaamaga. Nanosatelliitide puhul on levinud UHF ja VHF amatöörraadiosageduste kasutamine ja andmesidekiirused 1200-9600 bit/s, aga üha rohkem hakkavad levima S-sagedusala saatjad andmete alla laadimiseks, mille kiirus 1-3 Mbit/s.
5. Struktuuri ja mehaanika alamsüsteem (Structure, STR), mille ülesandeks on satelliidi raami, küljepaneelide ja muu mehaanika väljatöötamine. Materjaliks kasutatakse alumiiniumi, mida nõuab kuupsatelliitide standard.

Samuti arvestatakse selles uuringus ka pikosatelliite, mis on massiga 100 g – 1 kg, sest nad võivad olla sama võimekad kui esimesed kuupsatelliidid. Nende hulka kuuluvad ka taskusatelliidid (PocketQub), mis on 5 cm küljepikkusega kuubid. Välja on jäetud femtosatelliidid, mille mass jääb vahemikku 10 g kuni 100 g, sest neid veel ei ole või on nende pardal ainult üks andur koos väga nõrga raadiosaatjaga. [37] Esimesed 104 femtosatelliiti Sprite saadeti orbiidile projekti KickSat raames 3U kuupsatelliidiga 4. mail 2014, aga ajaloenduri ootamatu taaskäivitamise tõttu põles KickSat atmosfääris ära enne Spritede välja lükkamist [38].

Nanosatelliidid on saavutanud suure populaarsuse, sest kosmosesse on saadetud juba umbes paarsada nanosatelliiti erinevatest riikidest üle maailma ning veel rohkem projekte on arendamisel. Edu taga on nende standardne ja suhteliselt väikse massiga ning mõõtmetega ehitus, mis võimaldab neid arendada ja kosmosesse saata suhteliselt odavalt ja kiiresti. Näiteks, satelliidi valmistaamiseks võib kuluda 1 kuni 5 aastat, sõltuvalt keerukusest ja valmissüsteemide kasutamisest ja 1U materjalide ja komponentide kulud võivad olla suurusjärgus 50 000 eurot ning 1U üles saatmine maksab keskmiselt 60 000 eurot.

Esimesed nanosatelliidid saadeti kosmosesse juba 50ndate lõpus ja esimesed kuupsatelliidid 2003. a. Kõige esimene nanosatelliit oli Ameerika Ühendriikide teine satelliit ja üldse neljas satelliit maailmas, Vanguard-1 (joonis 2), kaaluga 1,47 kg ja 165 mm läbimõõduga kera, mis saadeti kosmosesse 17. märtsil 1958. Ka Ühendriikide esimene satelliit, Explorer-1, oli peaaegu nanosatelliit, kuna selle mass oli 13,97 kg. Võrdluseks kõige esimene satelliit, Sputnik 1, kaalus 83,6 kg. Vanguard-1 sisaldas 10 mW akutoitel raadiosaatjat ja päikesepaneelidega ühendatud 5 mW raadiosaatjat. Lisaks olid sisemise temperatuuri mõõtmiseks 2 termistori. Ta töötas 7 aastat ja on siiani orbiidil. [39]

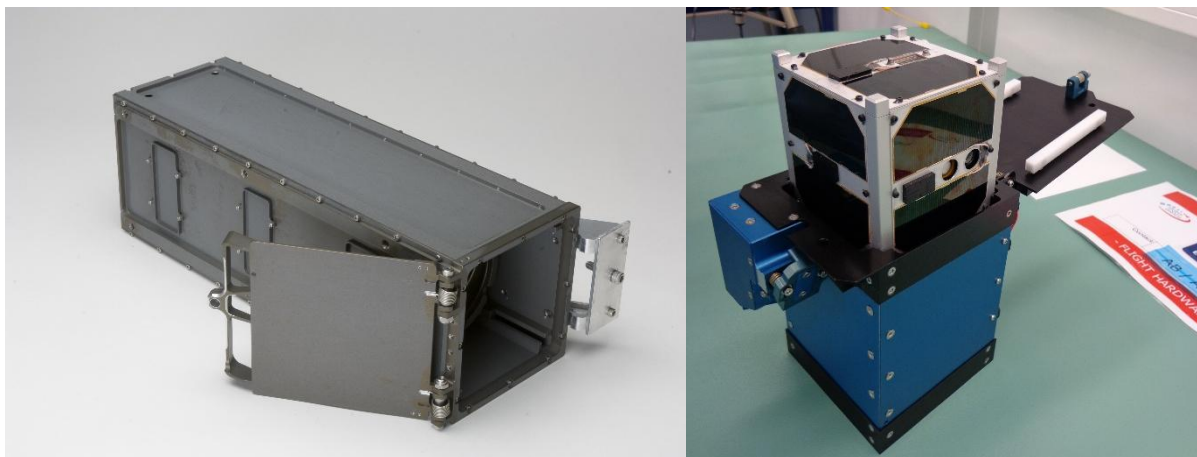


Joonis 2. Kõige esimene nanosatelliit, ja Ameerika Ühendriikide teine satelliit, Vanguard-1 [39]

Raketid muutusid võimsamaks ja nii kasvasid ka satelliitide massid, et pardale panna rohkem teadusaparatuuri. Raadioamatööridel õnnestus veenda Ameerika Ühendriikide Õhujõude asendama raketi ballast teise satelliidiga ja nii saadeti 1961. a. ja 1962. a. üles amatöör-raadio satelliidid 5 kg OSCAR-1 ja 10 kg OSCAR-2 [40], mis jäid kümneteks aastateks viimasteks nanosatelliitideks. Huvi nanosatelliitide vastu taastus 90ndatel kui elektroonika miniaturiseerimise tulemusena oli võimalik hakata arendama täisväärtuslikke nanosatelliite, mis sisaldasid juba kõiki olulisi satelliidi alamsüsteeme, nagu näiteks inglise Surrey Satellite Technology 6,3 kg SNAP-1 [41].

Kuupsatelliitide idee pakkusid välja professorid Jordi-Puig Suari Kalifornia Tehnikaülikoolist ja Bob Twiggs Stanfordi Ülikoolist. Eesmärk oli võimaldada tudengitel ise välja mõelda, ehitada, testida ja opereerida satelliite, mille võimekus oleks sarnane Sputnik-1ga. Kuup 10 cm küljepikkusega tuli sellest, et see oli professorite arvates piisavalt suur, et mahutada raadiosaatja koos aku ja päikesepaneelidega. Kuupsatelliidid ei olnud plaanitud saama standardiks, aga kujunes nii välja. Veel vähem nägid professorid ette seda, et neid hakkavad kasutama ülikoolid, ettevõtted ja kosmoseagentuurid üle maailma. [42]

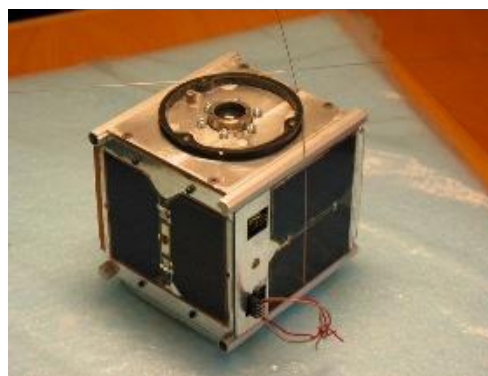
Ühtne standard lubas kasutusele võtta ühtlustatud adapteri (Picosatellite Orbital Deployer, POD), mille sisse kuupsatelliidid pannakse. See kinnitatakse raketi ülemise astme külge ja sealt lükatakse nanosatelliidid pärast luugi avanemist vedru abil kosmoses välja. Neist on mitmesuguseid variante, mis on välja töötatud erinevate kosmoseagentuuride ja –ettevõtete poolt. Levinumad on 3U P-POD, mida kasutatakse peamiselt Ameerikas ja erinevas suuruses ISIPOD, mis on tehtud Hollandi ettevõtte ISIS (Innovative Solutions in Space) poolt, mille sees ka ESTCube-1 üles saadeti (joonis 3).



Joonis 3. Vasakul 3U P-POD (Poly-Picosatellite Orbital Deployer) [43] ja paremal 1U ISIPOD, mille sees ESTCube-1

Esimesed 6 kuupsatelliiti saadeti üles 30. juuni 2003. a. Plesetski kosmodroomilt Venemaalt. Nende hulgas olid 2 Taani satelliit AAU CubeSat ja DTUSat, Jaapani CubeSat XI-IV ja CUTE-1, Kanada CanX-1 ja USA QuakeSat, mis oli esimene 3U kuupsatelliit. XI-IV töötab senini, rohkem kui 10 aastat pärast starti.

Järgmised 3 saadeti üles 2005. a, pärast mida on igal aastal kosmosesse saadetud keskmiselt 5-10 nanosatelliiti, välja arvatud viimase 2-3 aasta jooksul, millal nende arv on teinud tõsise hüppe. Aastal 2006 hävines vene Dnepri raketi stardil korraga 14 kuupsatelliiti. Tehnilise võimekuse näiteks võib võtta taanlaste AAU CubeSat-i (joonis 4), millel oli 1,2 Kbit/s raadioside, 1,3 MP kaamera ja elektromagnetpoolidega asendi juhtimise süsteem. [45] Kümme aastat hiljem on 1U kuupsatelliidid valdavalt sarnaste omadustega.



Joonis 4. Taani Aalborgi Ülikooli, ja üks esimesi kuupsatelliite, AAU Cubesat [44]

Tänase tipptehnoloogia näiteks võib võtta USA firma Planet Labs satelliidi Dove (joonis 5), millel on lahtikäivad päikesepaneelid, 5 meetrise resolutsiooniga kaamera, hoorattad satelliidi asendi täpseks juhtimiseks ja nanosatelliitide mõistes kiire 4 Mbit/s raadioside. [47]

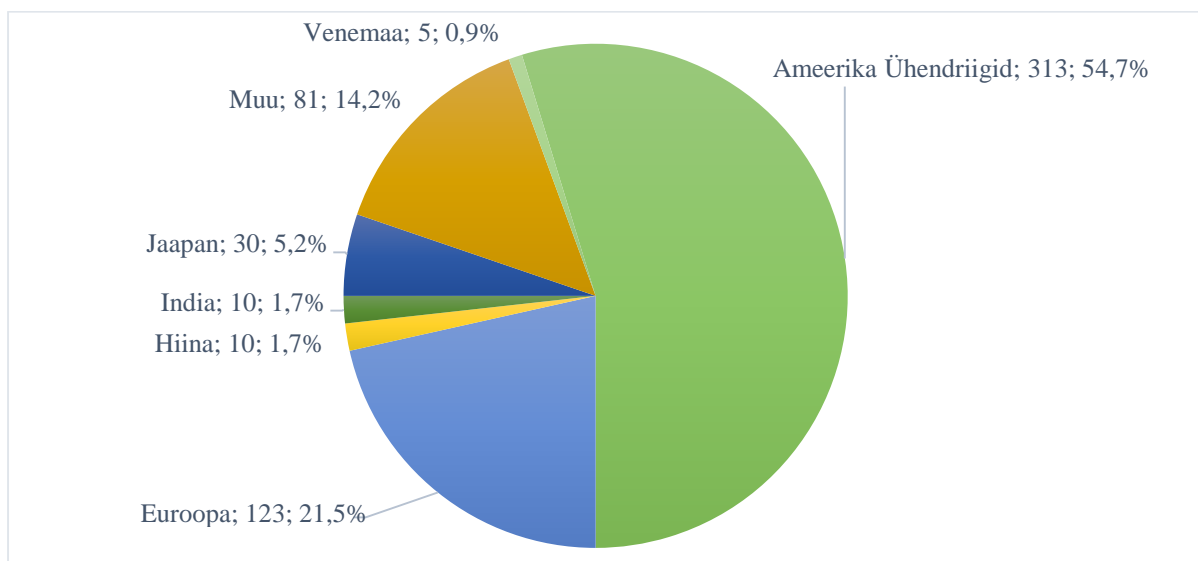


Joonis 5. USA firma Planet-Labs Dove 3U kuupsatelliit [46]

Nanosatelliitide kiire tehnilise arengu taga on ka võimalus võtta suuremat riski ning kasutada kõige uuemat, kuid mitte kosmoses katsetatud tehnoloogiat. Sama aja jooksul on toimunud ka kiire areng elektroonikatööstuses ja nanosatelliidid kasutavadki sarnaseid komponente, mis on kasutusel näiteks nutitelefonides.

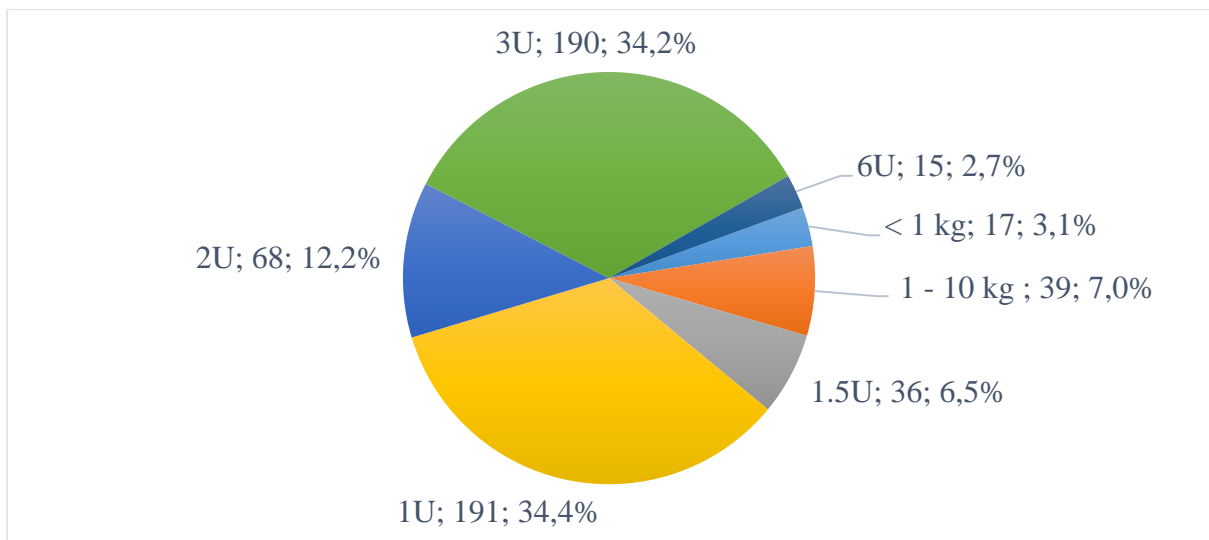
3.1 NANOSATELLIITIDE ARENDAMISE HETKESEIS

Selles peatükis kirjeldatakse nanosatelliitide arengu hetkeseisu maailmas ja Euroopas. Joonisel 6 on 572 nanosatelliidi jagunemine 51 riigi järgi, mis põhineb tabelil lisas 2. Kõige rohkem on Ameerika Ühendriikides, kust on pärit 313 ehk 54,7% nanosatelliiti. Teisel kohal on Euroopa 21,5% ja kolmandal Jaapan 5,2%. Euroopas on 123 nanosatelliidi projekti 26 riigist. Esimesel kohal on Saksamaa 23 satelliidiga, järgnevad Itaalia ja Suurbritannia. Ülejäänud on suhteliselt võrdsed olenemata oma geograafilisest suurusest.



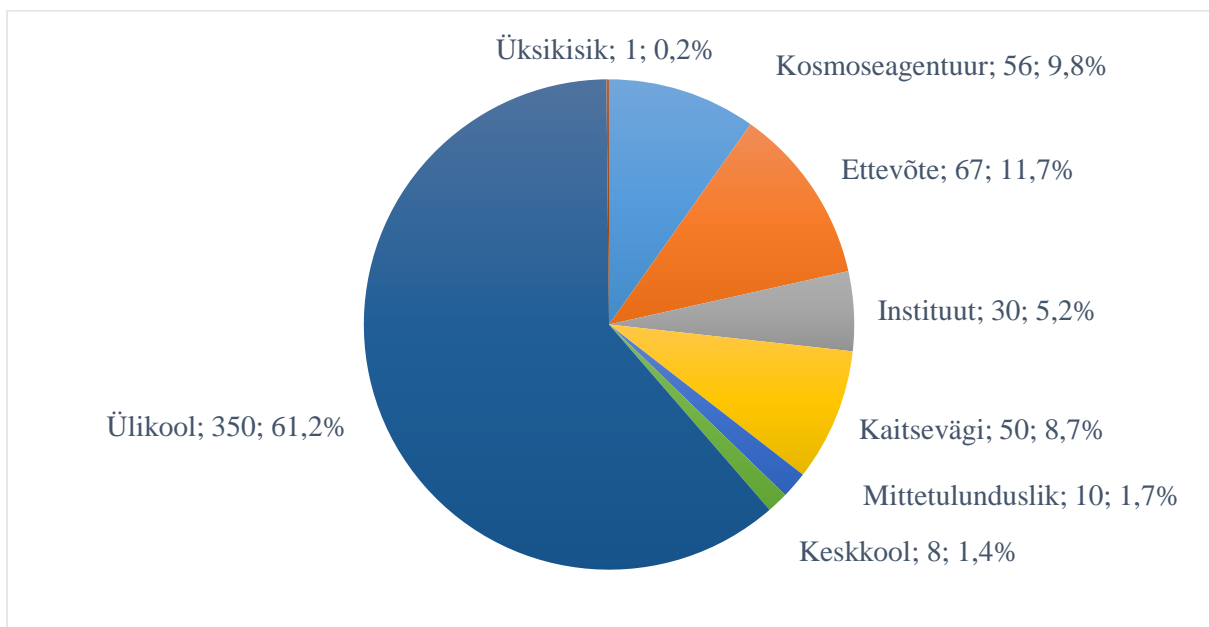
Joonis 6. Nanosatelliitide arv riikide kohta maailmas

Joonisel 7 on nanosatelliitide jagunemine suuruse järgi maailmas. Kuupsatelliidid on kõige populaarsemad ja nendest omakorda on levinumad 1U ning 3U suurused, vastavalt 34,4% ja 34,2%. Muid tüüpi nanosatelliite on ainult 10,1% ja sinna alla lähevad kõik satelliidid massiga 100 g kuni 10 kg, mis ei ole kuupsatelliidid. Euroopas puudub 1,5U variant ja levinum on 1U suurus. Kuna 1U kuubiku üles saatmine on kõige odavam, siis see on populaarne valik ülikoolide esimesteks satelliitideks. USAs pakub Riiklik Aeronautika- ja Kosmosevalitsus ehk NASA (National Aeronautics and Space Administration) tasuta üleslende oma ülikoolide kuupsatelliitidele, mis teeb suuremate arendamise ja üles saatmise lihtsamaks.



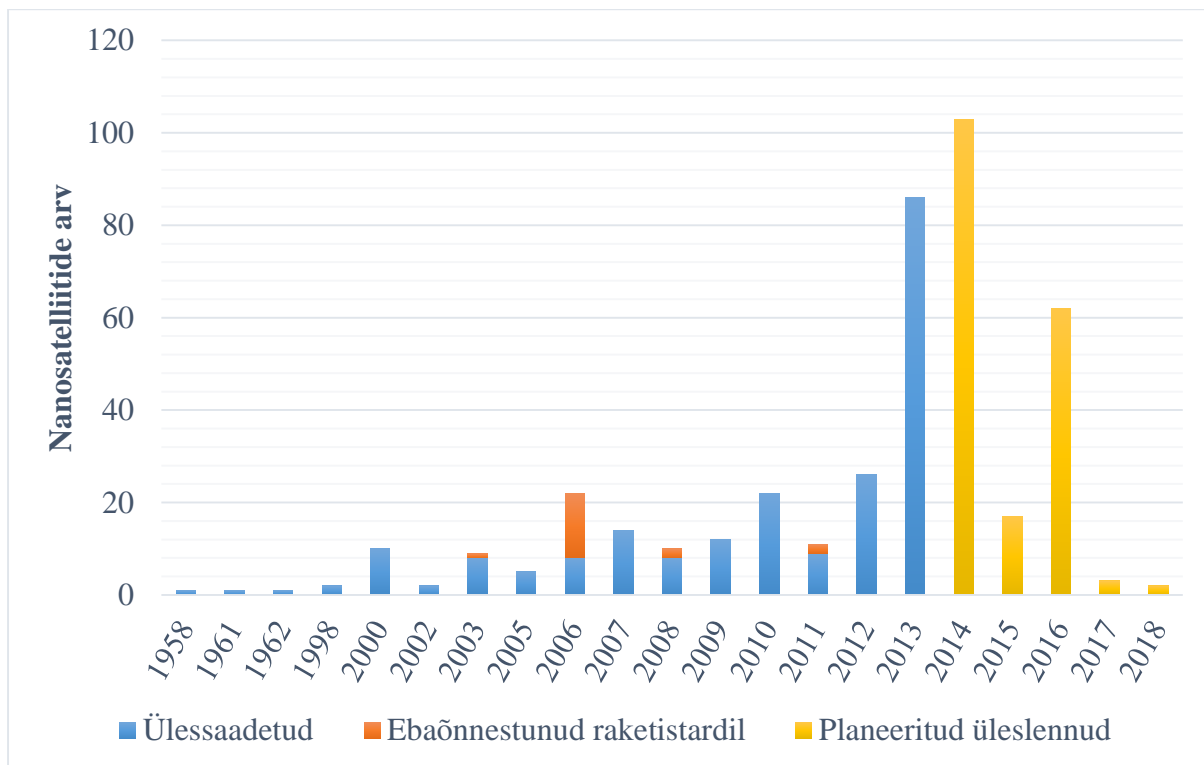
Joonis 7. Nanosatelliitide jagunemine suuruse järgi maailmas

Organisatsioonide jaotus maailmas on joonisel 8, kus ülikoolid on kõige populaarsemad (61,2%). Üha enam on aga erafirmad, kaitseväed ja kosmoseagentuurid saanud teadlikumaks nanosatelliitidest ja nende eelistest võrreldes suurte satelliitidega ning nende poolt arendatud tehiskaaslaste osakaal kasvab. On ka keskkooli, kus on oma kuupsatelliitide programmid. Hojun Song on korealane, kes on 7 aasta jooksul üksi arendanud ja üles saatnud kuupsatelliidi Open Source Satellite Initiative – 1 (OSSI-1) [48]. Euroopas on ülikoolides arendatud satelliitide osakaal veel suurem ja puudub kaitseväge osa.



Joonis 8. Nanosatelliitide jagunemine neid arendavate organisatsioonide järgi maailmas

Nanosatelliitide suurt populaarsuse kasvu maailmas näitab joonis 9, kus on kõik teadaolevad üles saadetud nanosatelliidid ja planeeritavad üles saatmise aastad. Esimesed kuupsatelliidid saadeti üles 2003. Aastal 2013 saadeti nanosatelliite üles juba 86 ja aastal 2014 on see tõenäoliselt üle 100. Neile lisandub 131 arenduses olevat projekti, mille kohta pole veel üles saatmise aastat välja kuulutanud, aga mis eeldatavalt toimuvad lähiaastatel. Andmebassis on 23 projekti, millest pole olnud mitmeid aastaid uudiseid või mis on teadlikult lõpetatud ilma satelliidi kosmosesse saatmiseta. Euroopas on ka nanosatelliitide hüppeline kasv, aga pole veel teada kas see kasv jätkub või vahepeal stabiliseerub, sest peamised kasvu mootorid maailmas on eraettevõtted, aga Euroopa ettevõtted pole suuri nanosatelliitide võrgustike projekte välja kuulutanud.

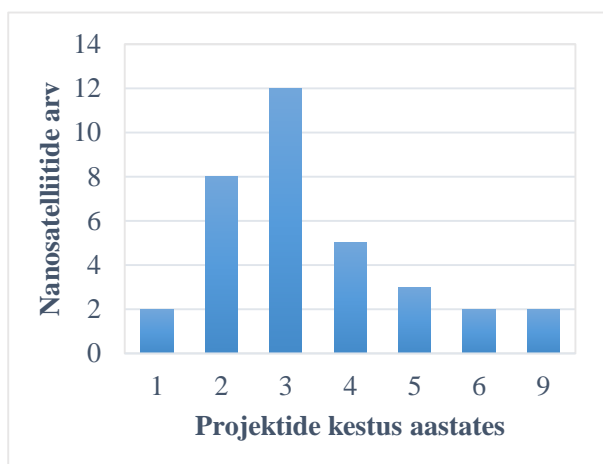


Joonis 9. Üles saadetud nanosatelliidid koos planeeritud missioonidega üle maailma

3.2 NANOSATELLIITIDE PROJEKTIDE OMADUSED

Selles alampeatükis vaadatakse nanosatelliitide projekte kirjeldavaid omadusi.

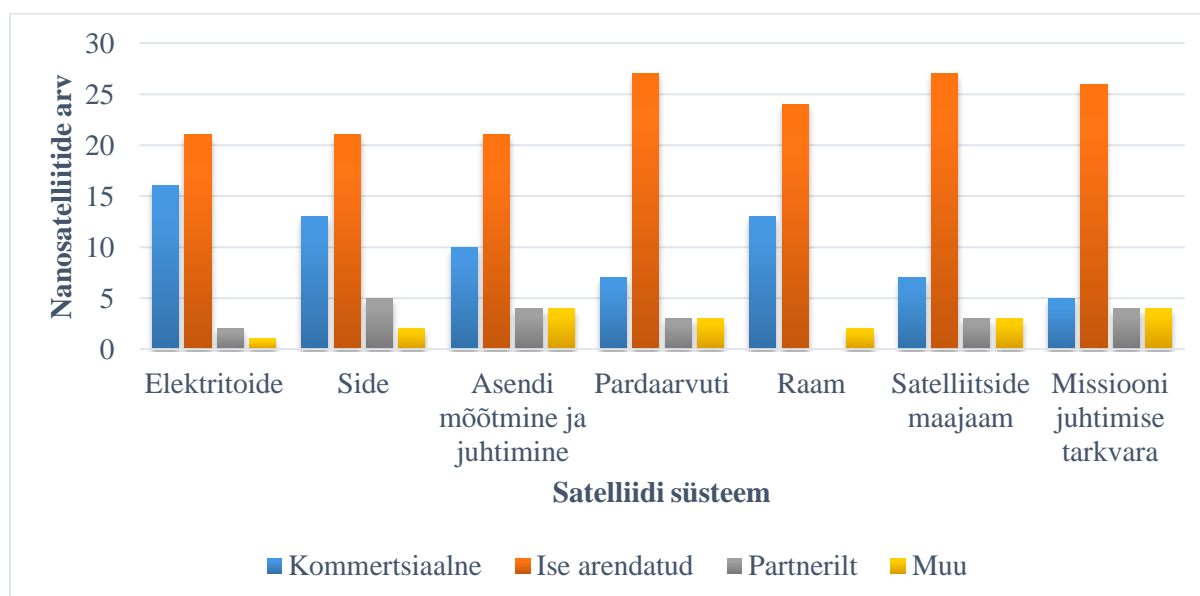
Levinuim nanosatelliitide projektide pikkus on 3 aastat (joonis 10) ja keskmine 4 aastat. See on koos arendamise ja orbiidil satelliidi töötamise ning opereerimise faasiga. Kestus sõltub projekti ülesehitusest, eesmärkidest ja missiooni keerukusest. Ostes kõik või suurema osa alamsüsteeme, on kuupsatelliidi ehitamine ühe aastaga võimalik. Samal ajal hariduslikud projektid võivad kesta 5 aastat või



Joonis 10. Nanosatelliitide projektide ajaline kestus

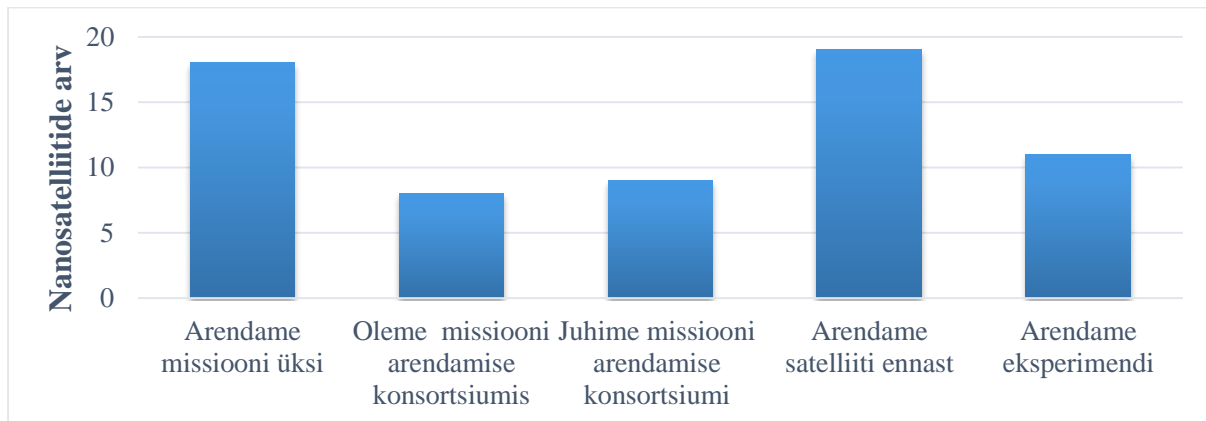
kauemgi, kuna kõik arendatakse tudengite poolt ise ja eksperiment on keeruline ning nanosatelliitide tehnoloogilisi piire edasilükkav. Trend on ajaliselt lühemate projektide poole, mida võimaldab varasem kogemus ning võimalus kuupsatelliidi komponendid osta.

Joonisel 11 on nanosatelliitide alamsüsteemid ja nende saamise viis. Kuna suur osa küsitlusele vastajatest olid seotud ülikoolide hariduslike projektidega, siis on ka kõige levinum kõik süsteemid ise arendada. Kõige tihemini ostetakse elektrienergia alamsüsteeme, sidesüsteeme ja satelliidi raame, sest need on kõige kriitilisemad või pole sobivat kompetentsi.



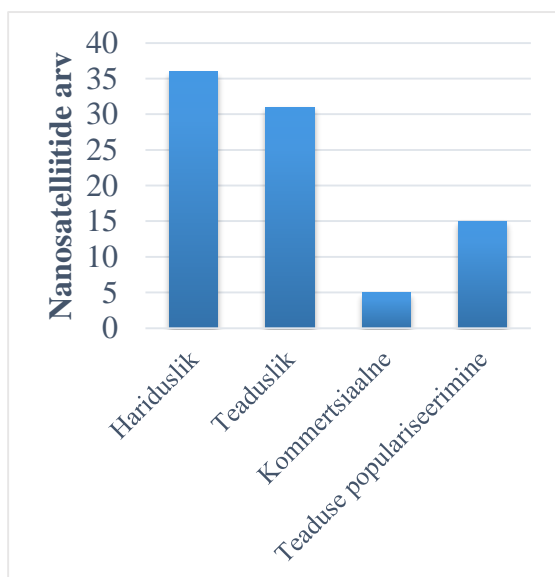
Joonis 11. Nanosatelliitide süsteemide arendamisviiside jagunemine

Suurem osa meeskondi arendab missiooni üksi või arendavad satelliidi ja eksperiment on pärit mujalt (joonis 12). On ka levinud, et missiooni elluviimiseks on moodustatud konsortsium.

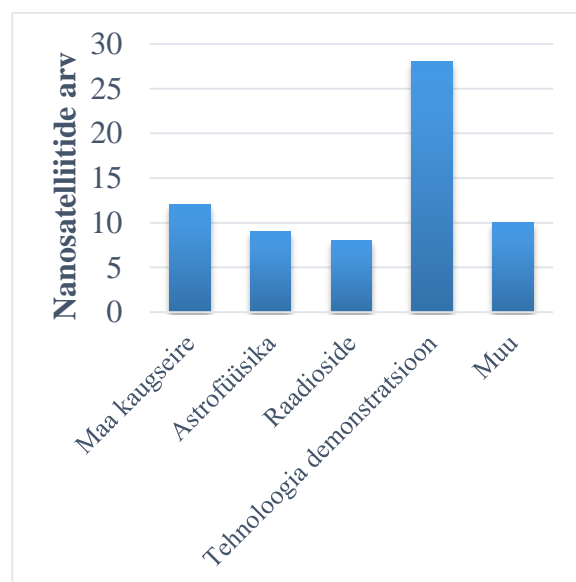


Joonis 12. Nanosatelliitide missioonide organisatsioone ja vastanuid kirjeldavad kategooriad

Missioonide kõige olulisemad tegurid on haridus ja teadus (joonis 13). Kuna enamus vastanutest on ülikoolidest, siis on see ettearvatav. Teaduse populariseerimine on ka oluline, aga mitte nii suurel määral. Äriline eesmärk on kõige vähemtähtsam. Missioonide valdkondadest on kõige levinum tehnoloogia demonstreerimine orbiidil (joonis 14). See tähendab, et arendatakse näiteks oma satelliidi alamsüsteeme ja testitakse neid orbiidil või testitakse suuremate satelliitide jaoks mõeldud süsteeme enne nanosatelliitidega. Levinud valdkonnad on veel Maa kaugseire, astrofüüsika ja erinevad raadioside eksperimentid.



Joonis 13. Nanosatelliitide missioonide jaoks olulised kategooriad



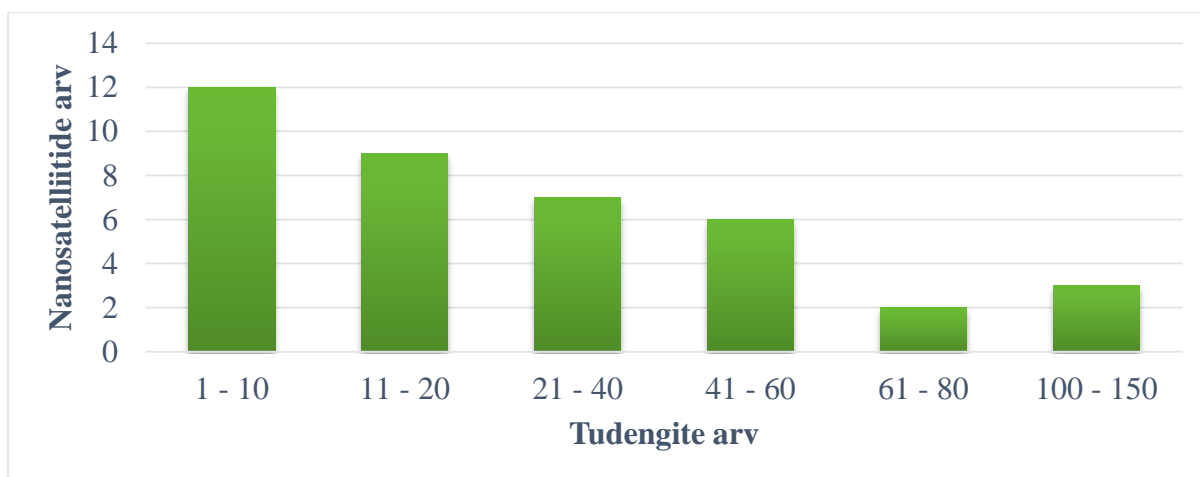
Joonis 14. Nanosatelliitide missioonide valdkonnad

4 NANOSATELLIITIDE PROJEKTIDE SEOS HARIDUSEGA, INNOVATSIOONIGA JA TEADUSE POPULARISEERIMISEGA

Nanosatelliitide projektide peamine väline edukuse kriteerium on tihti satelliidi valmishitamine, kosmosesse saatmine ja seal edukalt eksperimendi läbiviimine. Tegelikult ei ole vähem oluline projektide mõju tudengite haridusele, innovatsioonile ja teaduse populariseerimisele ühiskonnas.

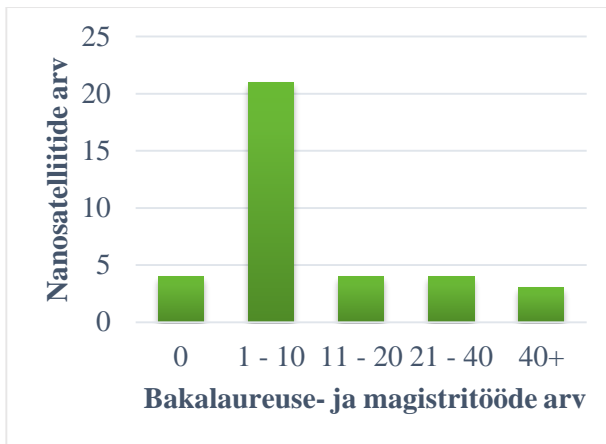
4.1 NANOSATELLIITIDE HARIDUSLIKUD ASPEKTID

Nanosatelliidid ongi peamiselt haridusliku eesmärgiga, sest neid arendavad ülikoolid (joonis 8). Tudengite arv nanosatelliitide projektides erineb suurel määral (joonis 15). On suuri ja mitmeid aastaid kestvaid projekte, kust osaleb kokku suurusjärgus 100 tudengit, aga on ka projekte ainult paarikümne tudengiga. Väiksema meeskonna puhul on suurem võimalus õppida üksikisikuliselt rohkem, aga samal ajal on tõenäoliselt vaja kasutada rohkem valmislahendusi, sest kõike ei jõua sel juhul ise arendada.

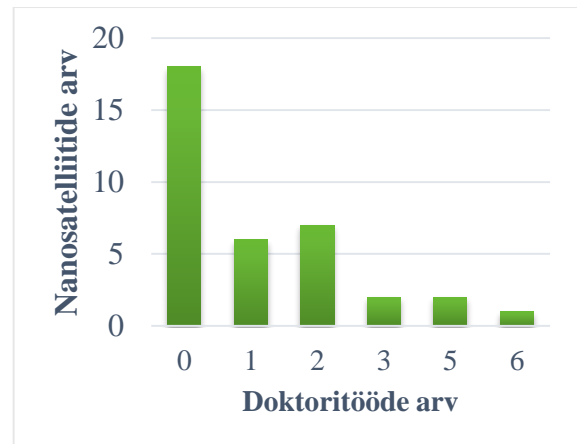


Joonis 15. Tudengite arv nanosatelliitide projektides

Kuigi suurem osa projekte on ülikoolides, siis lõputööde arv on suhteliselt väike (joonis 16). Koguarv on suur, aga enamustes projektides jääb lõputööde arv alla 10ne. Näiteks ESTCube-1 projekti raames tehakse kokku üle 40 lõputöö. Suures osas projektides ei saada ka doktorikraade (joonis 17), mis võib juhtuda olukorras, kus satelliit arendatakse ainult bakalaureuse- ja magistritaseme kursuste raames.

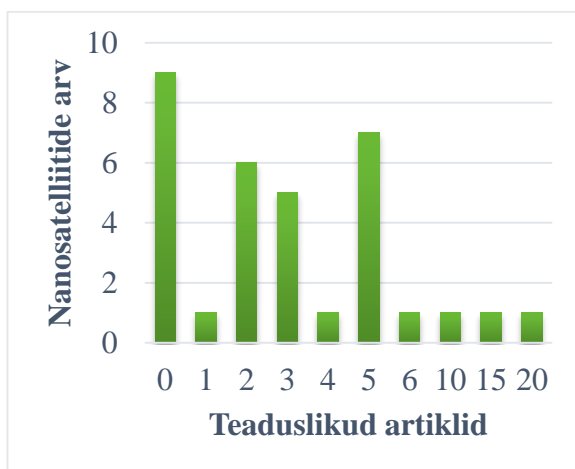


Joonis 16. Lõputööde arv projekti jooksul kokku

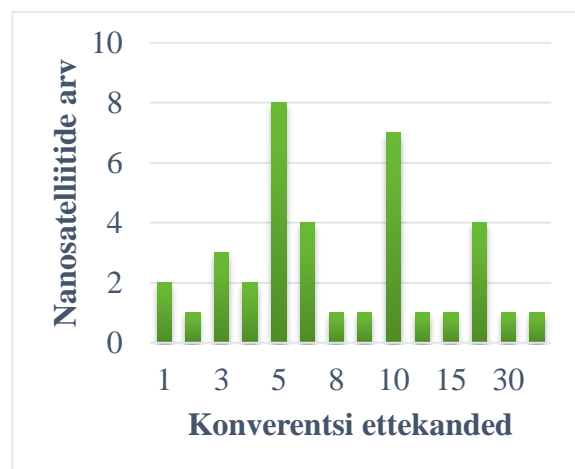


Joonis 17. Projektidega seotud doktoritööde arv

Teaduslike publikatsioonide hulk on suhteliselt suur (joonis 18), aga on ka suur hulk projekte, kus on null või ainult üksikud publikatsioonid. Konverentside ettekannete arv on sellest suurem (joonis 19), kuna valdav enamus meeskondi soovivad tähelepanu ja see on tudengitele hea avaliku esinemise harjutamise võimalus.



Joonis 18. Nanosatelliitide projektide teaduslike publikatsioonide arv



Joonis 19. Nanosatelliitide projektide konverentside ettekannete arv

4.1.1 Hariduslikud projektid ülikoolides

Töötubade aruteludel selgus, et ülikoolide nanosatelliitide projekte võib jaotada õpilaste kaasamisviiside järgi ja satelliitide arendamise põhimõtete järgi. Tudengite kaasamiseks ülikoolides on kaks peamist viisi. Esimene on valdavalt vabatahtlikkuse alusel, mille puhul suurem osa tudengeid saab sellest lõpu- või kursusetöö, nagu näiteks ESTCube-1 projektis. Teine on peamiselt õppekavade kursuste raames projektipõhiselt satelliidi ehitamine, mis on näiteks levinud Aalborgi Ülikooli AAUSAT projektides ja Viini Tehnikaülikoolis.

Peamised kaks hariduslikku lähenemisviisi satelliidi arendamisele on kogu satelliidiga seotud alamsüsteemide ise arendamine või arendatakse ise osa süsteeme ja ülejäänud ostetakse või saadakse partneritelt. Lähenemisviis sõltub projektist ja selle eesmärkidest ning ressurssidest. Kui on suur meeskond ja mitu aastat aega, siis on võimalik kõik ise arendada, aga kui on väike meeskond ja vähe aega, siis on mõistlikum osa asju osta. Ise ehitatud nanosatelliidid on näiteks Norra NUTS [33], Taani AAUSAT [15], Belgia OUFTI-1 [26] ja ESTCube-1.

4.1.2 Hariduslikud projektid ettevõtetes

Uuringust selgus, et ettevõtted on kasutanud nanosatelliite, et õpetada ja treenida oma uusi töötajaid. Näiteks suurel Euroopa kosmoseettevõttel Airbus Defence & Space (endine Astrium) oli LunchSat [49], Inglismaa väikesatelliitide ettevõttel Surrey Satellite Technology on STRaND [50], Lõuna-Aafrika kaitsetööstusettevõttel Denel Dynamicsil on DynaCube [51] ja Berlin Space Technologies kasutab tudengeid oma toodete arendamisel.

4.1.3 Hariduslikud programmid kosmoseagentuurides

Kosmoseagentuuridel on ka oma nanosatelliitide projektid, mis on mitmes mõttes hariduslikud, aga ei ole teada, et see oleks nende põhiline eesmärk. Samas on kosmoseagentuuridel programmid, mis toetavad hariduslike nanosatelliitide üles saatmist. NASAl on ElaNa (Educational Launch of Nanosatellites) programm [52], kus ülikoolide nanosatelliidid saavad kandideerida tasuta üles saatmise võimaluseks USA raketidel. Euroopa Kosmoseagentuuril ehk ESA (European Space Agency) on sarnased programmid *CubeSats for Vega maiden flight* ja *Fly your satellite!*, aga need toimuvad ebaregulaarselt ja palju väiksemas mahus.

4.2 NANOSATELLIITIDE SEOS INNOVATSIOONIGA JA ETTEVÕTLIKKUSEGA

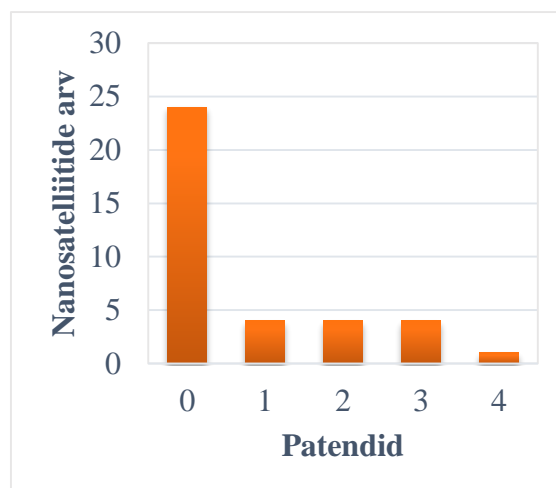
Nanosatelliitide seost innovatsiooniga näitab patenteerimine ja nanosatelliitide kasutamine innovatiivsetel viisidel. Ettevõtlikkust näitab idufirmade loomine tudengite poolt. Patentide saamine on haruldane (joonis 20), aga patentide arv kokku on siiski üsna suur. Ettevõtted on need, kes enamasti patenteerivad.

4.2.1 Ettevõtlikkuse kasv ülikoolides

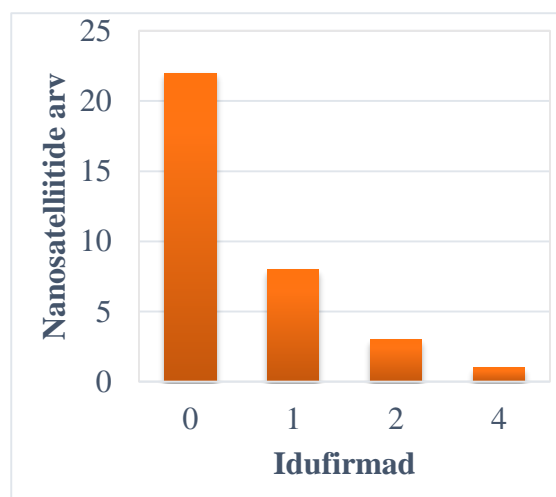
Idufirmade (spin-off) alustamine on ka haruldane (joonis 21). Ja siin see ei tähenda see seda, et ettevõtte tegeleb kosmosetehnoloogiaga, vaid seda, et projektis osalenud inimesed on alustanud uut ettevõtet projektis osaledes või varsti pärast lõpetamist. Töötubade aruteludel selgus, et tihti pole ka mingeid märke, et tudengid sooviks ettevõtlusega alustada. Pigem saavad tudengid head töökohad olemasolevates ettevõtetes.

Ülikoolide projektidest on siiski välja kasvanud ühed tuntumad ja edukamad nanosatelliitide ettevõtted nagu näiteks ISIS (Innovative Solutions in Space) Hollandis, mis kasvas välja Delfti Tehnoloogiaülikooli nanosatelliidi projektist [53] ja GomSpace Taanis [54], mis kasvas välja Aalborgi Ülikooli AAUSAT projektist.

Idufirmade arvu poolest on ESTCube-1 erand ja väga paljud tudengid tahavad teha oma ettevõtteid. Töö valmimise seisuga on ESTCube-1 projektist välja kasvanud 4 idufirmat ja lähima poole aasta jooksul lisandub tõenäoliselt 2 või 3 veel. Tudengite ettevõtlikkuse kasvu on suurendanud pikaajaline projektis osalemine ja võimalikult paljude alamsüsteemide ise arendamine [7]. Selline uute ettevõtete alustamine on väga kasulik, sest kõrgtehnoloogilise tootmise suurenemine Eestis on kooskõlas ka riiklike prioriteetidega.



Joonis 20. Nanosatelliitide projektidega seotud leiutiste patenteerimine



Joonis 21. Nanosatelliitide projektidest väljakasvanud ettevõtete arv

4.2.2 Innovaatiline nanosatelliitide kasutamine ettevõtetes

Ettevõtted kasutavad nanosatelliite, et testida kosmoses oma uusi tehnoloogiaid, mis on mõeldud suurematele satelliitidele või enda arendatud nanosatelliitidele. Lisaks on tekkimas nanosatelliitidel põhinevate teenuste turg, nagu näiteks USA firma Planet Labs, kelle 28-st 3U Dove nanosatelliidist koosnev võrgustik võimaldab jälgida Maad 3-5 m lahutusvõimega [47]. Mõned näited nanosatelliitidest, mida on ettevõtted valmistanud oma tehnoloogiatega demonstreerimiseks, on suure rahvusvahelise ettevõtte Boeingu CubeSat TestBed 1 (CSTB 1) ja nanosatelliitide ettevõtete GomSpace GOMX-1 ja ISISe Triton-1 kuupsatelliidid.

4.2.3 Innovaatiline nanosatelliitide kasutamine kosmoseagentuurides

Kosmoseagentuurid kasutavad nanosatelliite, et testida uusi tehnoloogiaid, meetodeid, protsesse ja ka teaduseks.

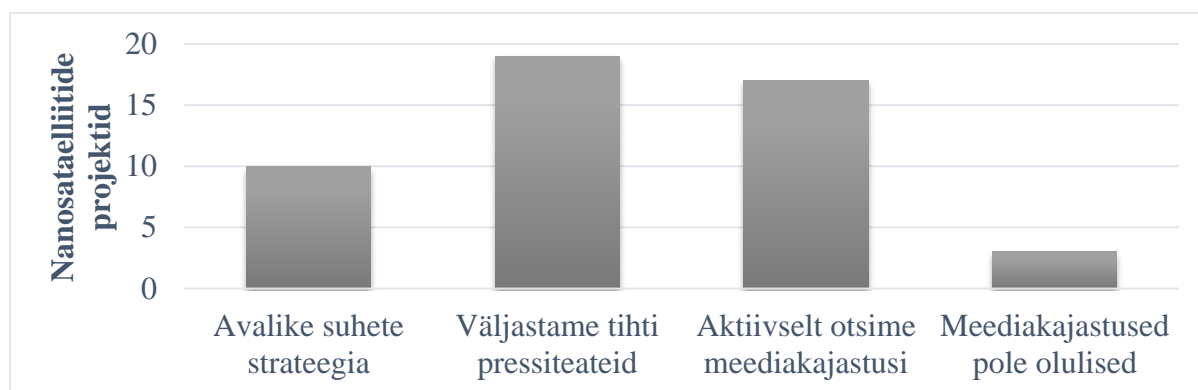
ESA on arendamas oma esimest 3U kuupsatelliiti OPSAT, mis on plaanis üles saata 2015. a. lõpus. Viimase 20 aasta jooksul pole ESA satelliitide ja missiooni juhtimise tarkvara oluliselt muudetud, sest see on keeruline ja suure riskiga. OPSATi eesmärk on võimaldada läbi viia erinevaid katseid kriitilise missiooni tarkvaraga. See tähendab, et see nanosatelliit peab olema paindlik, võimekas ja väga töökindel. [55]

Väikeste satelliitide programm NASA Ames uurimiskeskuses viib läbi PhoneSat projekti. PhoneSat on kuupsatelliit, mis põhineb moodsatel nutitelefonidel. Selle projekti üks peamine eesmärk on leida uusi viise kuidas teha kosmosemissioone ebatraditsioonilistel viisidel. [56] Mitmeid nutitelefone pardaarvutiks kasutavaid nanosatelliite on juba kosmosesse ka saadetud.

4.3 NANOSATELLIITIDE SEOS TEADUSE POPULARISEERIMISEGA

Kosmos on inspireeriv ja motiveeriv. Riigid, kellel on oma suured kosmoseprogrammid ja astronautid, omavad palju huvitavaid teaduse populariseerimise võimalusi. Väikesed riigid saavad kasutada nanosatelliite samal eesmärgil ja paljude nende jaoks on ka nanosatelliidid esimesed satelliidid. Veelgi enam mõjutab selline teaduse populariseerimine inseneri ja teadlase elukutse valikut üldiselt.

Uuringust selgus, et suurem osa nanosatelliitide projekte on huvitatud meedias figureerimisest (joonis 22) ja sellel on mitu põhjust. Esiteks, kuna paljud projektid demonstreerivad uusi tehnoloogiaid, siis on oluline sellest teavitada. Teiseks, ülikoolide projektidel kulaks ära rohkem osalevaid tudengeid. Kolmandaks, meedia tähelepanu on otseselt seotud teaduse populariseerimisega.



Joonis 22. Nanosatelliitide projektide lähenemine avalikele suhtele

Mõned nanosatelliidid, mis on maailmas suhteliselt tuntud ja mille projektide jaoks on teaduse populariseerimine oluline.

1. ArduSat on 1U kuupsatelliit USA ettevõttelt Nanosatisfy, mida rahastati ühisrahastuse teel Kickstarteris ja see on üks tuntumaid nanosatelliite maailmas. [31, 57]
2. PhoneSat on NASA projekt, mis kasutab nutitelefone satelliidi pardaarvutina. [56]
3. FUNCube-1 on Suurbritannia raadioamatööride nanosatelliit, millel on suur roll teaduse populariseerimisel. Selle projekti raames on ka välja arendatud USB arvutipulk, millega on võimalik klassiruumides satelliidi signaale vastu võtta. [58]

5 NANOSATELLIITIDE TEHNOLOOGIATRENDID, RAKENDUSED JA ÄRIMUDELID

Arendamisel, plaanitavate ja väljapakutud ideede põhjal saab vaadata tulevikku, et millised on nanosatelliitide tehnoloogiad ja missioonid 20 aasta pärast. Üles saadetud ja arendamisel olevate tehiskaaslaste järgi on prognoositud, et aastal 2020 saadetakse üles 300 nanosatelliiti. See on samas suurusjärgus kui konsultatsioonifirma SpaceWorks 2014. a. alguses avaldatud uuring, mis ennustab 2020. aastaks 410 nano- ja mikrosatelliiti [37]. Erinevus tuleneb peamiselt sellest, et nende valimis on ka mikrosatelliidid. Selline hulk on realistlik kui arvestada, et suur osa neist saavad olema masstoodetud ja praktiliselt ühesugused, sest kuuluvad suurtesse nanosatelliitide võrgustikesse. Pidevalt lisandub ka uusi riike ja ülikoole, kes oma nanosatelliite arendama hakkavad.

5.1 TULEVIKUTEHNOLOOGIAD

Peamised nanosatelliitide kasutuselevõttu pidurdavad tehnoloogiad on vähene elektrivõimsus, liiga algelised kosmoselaeva rakettmootorid, aeglane andmeside ja satelliidi asendi juhtimise täpsus. Neile lisanduvad ka uued tehnoloogiad, mis teevad võimalikuks nanosatelliitide kasutamise uutes valdkondades.

Energiatootmine

Lahtikäivad päikesepaneelid on juba kasutusel paljudel 3U ja mõnel 1U kuupsatelliidil ning müügil näiteks Clyde Space poolt [60]. Nende populaarsus kasvab ja samal ajal jätkub erinevat tüüpi uute ning suuremate lahtikäivate päikesepaneelide arendamine. Näiteks tulevad turule pööratavad päikesepaneelid, mis on praegu arendamisel ja suhteliselt suured, näiteks kuni 80W tootvad paneelid (joonis 23) ettevõttelt Tethers Unlimited [59]. Sellised arengud võimaldavad läbi viia uusi ja kauakestvamaid eksperimente.



Joonis 23. Tethers Unlimited kuni 80W elektrienergiat tootev lahtikäiv päikesepaneel [59]

Rakettmootorid

Nanosatelliitide rakettmootorite valik on hetkel väga piiratud, aga palju erinevat tüüpi mooduleid on arendamisel [61-67]. Uudsed tõukejõu süsteemid teevad võimalikuks uut tüüpi

missioonid ja eksperimendid, näiteks formatsioonis lendavate nanosatelliitide parvede ja planeetide vahelised missioonid.

Andmeside

Enamus kuupsatelliite ja eriti 1U suurused kasutavad andmesideks UHF (~437 MHz) ja VHF (~145 MHz) amatöörraadio sagedusi ja kiirust 9.6 Kbit/s, nagu 10 aastat tagasi. Turul on olemas S-sagedusala (~2.4 GHz) moodulid maksimaalse kiirusega kuni 3 Mbit/s ja neid kasutatakse osadel 3U nanosatelliitidel andmete alla laadimiseks. Kiiremat andmeside võimaldavad raadioside moodulid koguvad populaarsust ja praegu arendamisel olevad X-sagedusala (~8 GHz) ning Ka-sagedusala (~20-30 GHz) moodulid võivad tulevikus saavutada andmeside kiiruseid isegi kuni 100 Mbit/s [68, 69].

Optiline andmeside

Optiline laseritel põhinev andmeside on arendamisel ja testimisel, sest see võimaldab suuremaid kiiruseid ja ei tekita raadiohäireid. Tulevikus võib optilist andmesidet kasutada ka nanosatelliitidel, et suhelda maajaamadega või teiste nanosatelliitidega. Näiteks AeroCube-OSCD on 1,5U kuupsatelliitide paar, mille start on 2015. a. alguses. Selle missiooni eesmärgiks on demonstreerida optilist andmesidet 30 cm läbimõõduga teleskoobile kiirusega 5 Mbit/s, mis vajab suunamise täpsust 0,7 kraadi. Kiirus 50 Mbit/s vajaks suunamise täpsust 0,25 kraadi. [70]

3D prinditud komponendid

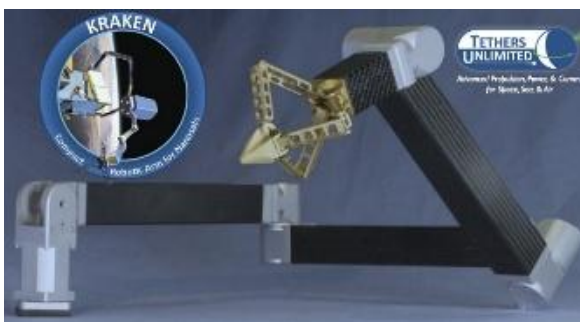
RAMPART ja Printsat on 2U kuupsatelliidid, mille raamid ja teised mehaanilised detailid on valmistatud 3D printeriga [71]. 3D printimise kasutuselevõtt nanosatelliitide tootmisel teeb võimalikuks valmistada keerukamaid mehaanilisi lahendusi palju odavamalt ja kiiremini ning kokkuvõttes võimaldab võtta nanosatelliitide väiksest ruumalast maksimumi.

Radarkaugseire

Tulevikus on nanosatelliidid võimelised läbi viima praktikas kasutatavaid radarkaugseire mõõtmisi. Soomlaste ICEYE projekt arendab kuuest nanosatelliidist koosnevat võrgustikku, et jälgida jääolusid Arktika laevateedel [72]. Teatatud on ka plaanidest kasutada nanosatelliite vastuvõtjatena, samal ajal kui mikrosatelliidid kiirgavad, näiteks TOPMEX-9 missioon [73].

Robotkäed

Nanosatelliitidele on arendamisel väikesed robotkäed, sest nad võimaldaksid suunata andureid ja suure võimendusega antenne ning monteeri kosmoses suuremaid struktuure. Näiteks ettevõttel Tethers Unlimited on arendamisel KRAKEN 4,2 kg massiga ja 7 vabadusastmega robotkäsi (joonis 24) [74].



Joonis 24. Tethers Unlimited KRAKEN robotkäsi [74]

Lahti pakkivad teleskoobid

Ennast kosmoses lahti pakkivad teleskoobid teeksid võimalikuks konkurentsivõimelised Maa kaugseire või astronoomia missioonid nanosatelliitidega. Näiteks NASA Ames uurimiskeskuses on arendamisel lahti pakkiv kosmoseteleskoop (joonis 25) läbimõõduga 15-20 cm, mis mahub 6U kuupsatelliiti [75]. Tokyo Ülikooli 8,5 kg nanosatelliit PRISM [76] oli ka ennast lahti pakkiva teleskoobiga.



Joonis 25. NASA Ames uurimiskeskuse 6U lahti pakkiv teleskoop [75]

5.2 NANOSATELLIITIDE TULEVIKUMISSIOONID JA -RAKENDUSED

Uuringust selgus, et nanosatelliidid ja eriti kuupsatelliidid on seni püsinud maalähedastel orbiitidel, sobivate üles saatmise võimaluste ja satelliitside maajaamade asukohtade tõttu. Uute missioonide otsimine ja tehnoloogia areng viib selleni, et esimesed nanosatelliidid saadetakse 2020. aastaks Kuu orbiidile ja Lagrange'i punktidesse. Tõenäoliselt tuleb ka nanosatelliite, millel on väga elliptiline orbiit või maalähedane ekvatoriaalne orbiit, mille praktilise kasutamise teevad võimalikuks maajaamade võrgustike tekkimine.

Järgnevad on mõned näited missioonidest ja eksperimentidest, mis on juba praegu või kuni 5 aasta pärast orbiidil demonstreeritud.

1. Maa kaugseire – Planet Labsi Flock-1 võrgustik ja soomlaste ICEYE on parimad näited.
2. Kosmoseprügi vähendamine – arendamisel on mitmed viise kuidas satelliite kiiremini orbiidilt ära tuua, näiteks elektrilise päikesepurje tehnoloogial põhinev plasmapidur

ESTCube-1 ja Soome Aalto-1 kuupsatelliitidel [77] ning päikesepurjed nanosatelliitidel CanX-7 [78] ja DeOrbitSail [79].

3. Laevade jälgimine – mitmetel nanosatelliitidel, näiteks AAUSAT-3&4, AISSAT-1 [80] ja Triton-1 [81], on AIS (Automatic Identification System) vastuvõtjad, mida kasutatakse laevadel. Satelliitide abil saab jälgida laevu ookeanide keskel ja teistes kohtades kuhu maaapealsete vastuvõtjate leviala ei ulatu.
4. Kommunikatsioonivõrgustikud – USA kaitsevägi on aktiivselt arendamas ja testimas nanosatelliitidel põhinevaid kommunikatsioonivõrgustikke [82]. Samuti kuulutas Euroopa Kosmoseagentuur hiljuti välja hanke uurimaks nanosatelliitide kommunikatsioonivõrgustike kasutamist ärilistel eesmärkidel.
5. Paaris lendamine – mitmed nanosatelliidid plaanivad demonstreerida paaris lendamist ja isegi omavahel põkkumist, mille teevad võimalikuks rakettmootorite areng. Näiteks nanosatelliidid DelFFI Phi & Delta [83], CanX-4&5 [84] ja STRaND-2 [85].
6. Astronoomia – ExoPlanetSat on 3U kuupsatelliit, mille missiooniks on avastada eksoplaneete [86]. Välja on pakutud ka palju teisi potentsiaalseid astrofüüsika missioone nanosatelliitidega [87].
7. Bioloogilised uuringud – NASA GeneSat-1 ja PharmaSat nanosatelliitidel olid pardal pisikeses laboratooriumis bakterid [88].
8. Maale tagasituleku kapslid – GamaSat on 3U kuupsatelliit, milles on kapsel, mis saadetakse Maale tagasi. Selle läbimõõt on umbes 9.5 cm ja kõrgus 5.5 cm ning see teeb võimaluks väiksete eksperimentide produktide Maale tagasisaatmise, et neid laborites põhjalikumalt uurida. [89]

Kuu, Marss ja kaugemale

Esimesed nanosatelliidid reisivad 10 aasta jooksul maalähedaselt orbiidilt kaugemale, näiteks Kuu ja Marsi orbiidile. Nanosatelliitide võrgustikke Kuu või Marsi orbiidil saaks kasutada ka andmesideks, teaduseks või positsioneerimiseks. Mõned ideed ja projektid selles valdkonnas on kuupsatelliidi saatmine Marsile ja tagasi, et mõõta kiirgust [90], 6U kuupsatelliit Uraani orbiidile [91] ja INSPIRE projekt, mis saadab 2 kuupsatelliiti Maa juurest eemale viivale trajektoorile [92]. Alates 2012. aastast on toimunud ka 3 LunarCubes konverentsi, mille teemaks on nanosatelliitide Kuu missioonid. Tulevikus võib olla võimalik ka maanduda Kuul nanosatelliidiga ja Vermonti Tehnikakolledži projekt Lunar Lander/Orbiter seda arendab [93].

Asteroidide otsimine ja kaevandamine

Väikseid masstoodetud nanosatelliite võiks kasutada suure hulga asteroidide avastamiseks ja uurimiseks, et leida parimaid kandidaate asteroidide kaevandamiseks tulevikus. Üks idee on näiteks taaskasutatav 6U Asteroid Prospector [94] ja sarnaseid satelliite arendavad ka asteroidide kaevandamist plaanivad ettevõtted Deep Space Industries [95] ja Planetary Resources [96]. Planetary Resources kasutab mikrosatelliite ja neil on palju investeringuid. Deep Space Industries loodab projekti alustada 6U ja 12U nanosatelliitide baasil (joonis 26).



Joonis 26. Deep Space Industries 6U Firefly nanosatelliit (vasakul) ja 12U Dragonfly satelliit (paremal) [95]

Kosmoselaevade abilised

Rakettmootoriga nanosatelliite oleks võimalik kasutada, et inspekteerida Rahvusvahelist kosmosejaama (International Space Station, ISS), teisi tuleviku kosmosejaamu, suuri satelliite ja planeetide vahelisi kosmoselaevu. Peamine roll oleks kosmoseprügi tekitatud kahjustuste jälgimine. Näiteks NASA AERCam programm arendas 5 kg vabalt lendavalt nanosatelliiti Mini-AERCam, mis oleks võimeline inspekteerima ISSi, aga sellest projektist pole olnud mitu aastat uudiseid ja tõenäoliselt on projekt lõpetatud [97].

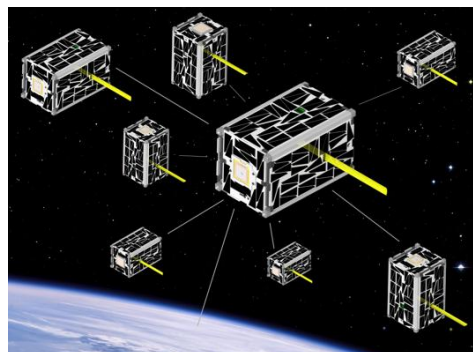
Monteerimine ja parandamine

Formatsioonis lendavad ja koos töötavad nanosatelliitide parved, mis monteerivad või parandavad kosmoses olevaid süsteeme, võivad olla 20 aasta pärast võimalikud. Üks arendusprojekt selles valdkonnas on AAReST (Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope), mille eesmärk on demonstreerida autonoomsest kosmoseteleskoobi kokkupanekut ja ümberkonfigureerimist, kasutades 3U nanosatelliite [98].

5.3 NANOSATELLIITIDE VÕRGUSTIKUD

Üksikutel nanosatelliitidel on tehnoloogiliselt keeruline konkureerida suurte satelliitidega, sest nad ei mahuta suuri eksperimente või teisi sama võimekaid kasulikke koormisi. Uuringust selgus, et nende eeliseid nähakse hoopis võrgustike moodustamisel, et näiteks tulevikus jälgida kogu Maad reaalajas. Järgnevalt on lühikirjeldused uuringu raames leitud olemasolevatest ja plaanitavatest nanosatelliitide võrgustikest.

1. Flock-1 on USA ettevõtte Planet Labs võrgustik, mis lasti kosmosesse veebruaris 2014 Rahvusvahelise kosmosejaama pardalt. See koosneb 28st 3U nanosatelliidist, mis pildistavad Maad 3-5 meetrise resolutsiooniga. [99] Seni pole avaldatud mitte ühtegi uudist, et ei ole teada kas missioon toimib plaanikohaselt. Madala orbiidi tõttu on nende eluiga umbes pool aastat ja on teatatud ka plaanidest saata üles järgmised võrgustikud.
2. Rahvusvahelise projekti QB50 teaduslik eesmärk on uurida ajalisi ja ruumilisi muutusi madalal termosfääris (kõrgusel 90 – 320 km) kasutades 40 2U kuupsatelliiti. Nanosatelliidid arendatakse välja ülikoolides üles maailma, aga nende pardale pannakse samasugused andurid. Plaanis on võrgustik üles saata aastal 2016. [100]
3. ESDN (Edison Demonstration of SmallSat Networks) missioon koosneb kaheksast 1,5U kuupsatelliidist (joonis 27). See projekt algas 2012. a. ja seda juhib NASA Ames uurimiskeskus. Iga satelliidi pardal on kiirguse mõõtmise andur. ESDN demonstreerib sidevõrgustiku lahendust, kus satelliidid jagavad enda mõõtmistulemusi ja ainult üks konkreetne satelliit saadab need Maale. Sellisel tehnoloogial on potentsiaali muuta andmete jagamine paindlikuks ja lihtsustada satelliitide parvede ja võrgustike missioonide juhtimist. [101]
4. Perseus 000 - 003 olid USA Los Alamose Riikliku Laboratooriumi eksperimentaalsed nanosatelliidid. Nad oli 1,5U suurused ja saadeti üles 2010. Perseuse programmi eesmärk on arendada kiirreageerimise satelliitide võimekus, et satelliidid mõne päevaga kokku monteerida ja orbiidile saata. [82]
5. Prometheus on ka 1,5U kuupsatelliit Los Alamose Riiklikust Laboratooriumist ja 8 tükki lennutati kosmosesse aastal 2013. Missiooniks on hinnata kuupsatelliitide sidevõrgustiku kasutamist lahingutandril. [93]



Joonis 27. NASA ESDN võrgustik orbiidil kunstniku nägemuses [101]

6. S-Net on Berliini Tehnikaülikooli missioon, mille start on aastal 2016. Eesmärk on demonstreerida satelliitide vahelist andmesidet. [102]
7. BRITE (BRiGht Target Explorer constellation) on kuue 7 kg astronoomilise nanosatelliidi võrgustik, millest pooled saadeti orbiidile eelmisel aastal. Igal satelliidil on 3 cm läbimõõduga teleskoop, et mõõta kõige heledamate tähtede heleduse muutumist. [103]
8. Välja on pakutud ka 6U nanosatelliitide võrgustik atmosfääri temperatuuri ja niiskuse mõõtmiseks, et paranda ekstreemsete ilmasündmuste ennustamist [104].
9. Fourier pöörde spektromeeter (FTS) 6U nanosatelliidi pardal võimaldaks orbiidilt jälgida troposfääri, mis samuti parandaks ilmaennustamist [105].
10. Välja on pakutud ka astronoomiliste satelliitide võrgustik HiMARC3D, mis võimaldaks saada suure resolutsiooniga stereopilte maapealsetest ja astronoomilistest sihtmärkidest, kasutades nelja 3U sünteetilise apertuuriga optilist teleskoopi [106].

Lisaks nanosatelliitide võrgustikele on arendamisel ka satelliidi maajaamade võrgustikud, et pikendada satelliitidega sidepidamise aega ja alla laetavate andmete hulka. Näiteks GENSO (Global Educational Network for Satellite Operations) on üks amatöörraadio maajaamade võrgustik, aga see ei ole kasvanud nii kiiresti ja nii suureks kui oodatud. [107]

5.4 POTENTSIAALSED ÄRIMUDELID JA TURUD

Nano- ja mikrosatelliitide turg on sel aastal hinnanguliselt 702,1 miljonit dollarit ja kasvab 2019. aastaks 1887,1 miljonile dollarile, mis vastab iga-aastasele kasvule 21,8%. [108]

Uuringust selgus, et nanosatelliitide arengut veavad peamiselt järgnevad rakendused.

1. Uute tehnoloogiate demonstreerimine orbiidil.
2. Ülikoolide hariduslikud eesmärgid, mille tõttu suureneb oluliselt nanosatelliitide arv ja turg. Selle tulemusena arendatakse ja katsetatakse kosmoses uusi tehnoloogiaid.
3. Teaduslikud eesmärgid, mille puhul on vajalik välja arendada uusi nanosatelliitide tehnoloogiaid.
4. Satelliitide võrgustikud üheaegseks mõõtmiseks.
5. Kosmosest jälgimine ja seire.
6. Elektroonika miniaturiseerimine, mis tuleneb teistest suurtest elektroonika turgudest.

Põhiliseks nanosatelliitide arengusuunaks on keskendumine missioonile ja eksperimendile satelliidi enda arendamise asemel. See võib tähendada suure osa satelliidi alamsüsteemide sisse ostmist. Tuleb jõuda nanosatelliitide komponentide kuluefektiivse masstootmiseni, sest see võimaldaks veel kiiremini ja odavamalt nanosatelliite ehitada.

Üks peamiseid nanosatelliitide turge ongi nanosatelliitide ja nende alamsüsteemide arendamine ja müümine. Edukamad ettevõtted on näiteks Clyde Space ja GomSpace ning kelle tootevalik on väga lai. Kokku on nanosatelliitidele alamsüsteeme arendavaid või teenuseid pakkuvaid ettevõtteid vähemalt mitukümmend ja nende arv kasvab pidevalt. Suur osa neist spetsialiseerub ka kindlatele valdkondadele ja alamsüsteemidele. Näiteks Berlin Space Technologies toodab kuupsatelliitide asendi mõõtmise ja juhtimise süsteeme [109]. Uuringust selgus ka, et nanosatelliitide komponentide turg on seni veel väike ja palju raha pole teenitud. Ettevõtjad loodavad nanosatelliitide arvu kiirest kasvust tulenevale käibe kasvule tulevikus. On ka palju uusi tehnoloogiaid ja tooteid, mille järele on või tekib nõudlus, ja neid on välja arendamas ja turule toomas valdavalt uued ettevõtted.

Suur turg on ka nanosatelliitide kosmosesse saatmine. Sellele lisanduvad testimise teenused, sest paljudel meeskondadel ei ole sobivaid seadmeid. Peamised ettevõtted on ISIS (Innovative Solutions in Space) ja UTIAS-SFL (University of Toronto Space Flight Laboratory) [110] ning NanoRacks, kes saadab nanosatelliidid kõigepealt ISSle, kust nad orbiidile lükatakse [111]. Väljatöötamisel on ka mitmeid väikseid rakette, mis sobivad ainult nanosatelliitidele. Nende esialgsed hinnad on aga suurusjärgus 10 korda suuremad (1-2 miljonit dollarit) kui senised (60 000 – 200 000 dollarit). See ei tasu tõenäoliselt lähiajal ära, sest orbiidi ja kindla kuupäeva valimine ei ole nii olulised faktorid nanosatelliidi üleslennutamise teenuse valimisel kui hind.

Uuringust selgus, et suurimaks turuks võib saada nanosatelliitide kasutamine ärilisel eesmärgil, milleks on mingisuguse teenuse pakkumine või nanosatelliitidelt pärinevate andmete müümine. Üks esimesi ja edukamaid näiteid on jällegi Planet Labsi Flock-1 nanosatelliitide võrgustik, mille tehtud fotosid müüakse. Maa kaugseire valdkonnas on ka soomlaste ICEYE projekt, mis plaanib nanosatelliitidega jälgida jääolusid Arktika laevateedel ja müüa neid andmeid [72]. Osa võimalikest teenustest on välja toodud ka alampeatükkides 5.2 ja 5.3.

6 DISKUSSIOON

6.1 NANOSATELLIITIDE ARENGUT TAKISTAVAD TEGURID

Nanosatelliidid on väikesed ja odavad. Sellepärast võimaldavad nad kiiresti testida uusi innovaatilisi ideid. Nanosatelliitide arendajate hulgas on ka seetõttu palju uusi vähese kogemusega töörühmi, mille tõttu on projekte tihti keeruline rahastada traditsioonilistel teaduse või ettevõtlust toetavate rahastusmeetmete abil.

Läbiviidud uuringust selgus, et nanosatellite arendavad töörühmad näevad, lisaks sobivate rahastusmeetmete puudumisele, peamiste takistavate teguritena järgmisi aspekte.

1. Ülikoolide jaoks on nanosatelliitide üles saatmine väga kallis.
2. Nanosatelliitide arendajate omavaheline koostöö ja informatsiooni jagamine on väike. Parem koostöö võimaldaks õppida teiste vigadest ja kogemustest ning soodustada veel kiiremat tehnoloogiat arengut.
3. Nanosatelliitide areng on olnud kiire ja on väga vähe kliente, kes oleksid nõus maksma nanosatelliitidega seotud teenuste eest. Tuleb tõsta potentsiaalsete klientide ja arendajate teadlikkust nanosatelliitide eelistest, võimekusest, arengutest ja arengupotentsiaalst.
4. Nanosatelliidid kasutavad andmesideks valdavalt amatöörradio sagedusi. Vabad sagedused on aga praktiliselt otsas ja amatöörradio sageduste kasutamisel on piiranguid. Näiteks ei tohi neid kasutada äriliste eesmärkidega nanosatelliitidel. Klassikaliste satelliitide raadiosageduste koordineerimise protsess on samas liiga pikk ja ei sobi kiiretele ja lühikestele nanosatelliitide missioonidele.

Ülikoolidele on nanosatelliidid efektiivsed probleemi- ja projektipõhise õppemeetodid ja seda valdavalt teatakse. Osalemine projektides tekitab kõrge motivatsiooni selle projekti lõpetamiseks juhul kui missioon on piisavalt põnev. Lisaks arendab see ülekantavaid oskuseid nagu näiteks probleemilahendus-, organiseerimis- ja analüüsioskuseid. [7] Ettevõtetele on ka nanosatelliidid hea viis õpetada uut tööjõudu ja testida uusi kosmosetehnoloogiaid kiiresti ning suhteliselt odavalt. Nanosatelliitide valdkonnas on võimalik leida ka uusi ärimudeleid ja turgusid, et pakkuda tooteid ja teenuseid, mis võiksid olla odavamad kui teised kosmose või maapealsed lahendused. Nanosatelliitide arendamine sobib odavuse tõttu hästi idufirmadele ja

teistele väiksematele uutele tegijatele. Suured traditsioonilised kosmosefirmad keskenduvad endiselt pigem suurte riiklike tellimuste täitmisele.

Kosmoseagentuuride jaoks võiksid nanosatelliidid samuti olla kuluefektiivne viis katsetada kiiresti uusi tehnoloogiaid. Võimalik on ka läbi viia teadusmissioone ja proovida uusi satelliitide arendamise meetodeid ning protsesse. Teadusmissioonid nanosatelliitidega on olulised uutele väikeste riikide kosmoseagentuuride ja –instituutidele, kellel ei ole võimalik ehitada suuri satelliite. Suurte kosmoseagentuuride jaoks vajab nanosatelliitide kasutuselevõtt küll mõtteviisi muutust. Näiteks ESA on poliitika, et satelliit peab kosmoses tööle hakkama ja töötama seal ettenähtud aja arenduskuludest hoolimata. See tähendab, et nanosatelliidid ei ole veel ESA jaoks usaldusväärsed. Kuna nanosatelliidid saavad olla aga suhteliselt odavad, siis tõrked peaksid olema aktsepteeritud, sest vastasel juhul lähevad ka nanosatelliidid ka väga palju maksma.

Uuringu tulemuste põhjal on ülikoolide jaoks nanosatelliitide üles saatmise hind kõrge. Tasuta või oluliselt odavamate stardivõimaluste leidumine võiks oluliselt kiirendada nanosatelliitide arendamist Euroopas. Väga hea näide, mida aluseks võtta, ongi NASA ELaNa programm, mis on väga edukas pakkumaks ülikoolidele tasuta üles saatmise võimalusi ja see on ka üks põhjus miks Ameerikas on nii palju nanosatelliite. Uuringus osalenud ettevõtted ei toonud samas välja nanosatelliitide üles saatmise kõrget hinda olulise takistava tegurina. Ambitsioonikamate ärimudelite puhul on mõned ettevõtted suutnud kaasata ka suuremahulisi investeeringuid. Näiteks Planet Labs on kokku saanud juba 65 miljonit dollarit ja Nanosatisfy on saanud 2 miljonit dollarit lisaks ligikaudu 100 000 dollarile, mille nad said ühisrahastuse portaalist Kickstarter. Kosmoseagentuuride jaoks on üles saatmise hind väike osa projektide eelarvest. Kosmoseagentuurid viivad läbi suurte satelliitide missioone ja iga raketi puhul jääb kasutamata ressursi. Sellisele suurele satelliidile ja raketile nanosatelliidi lisamine maksab ainult suurusjärgus 20 000 dollarit võrreldes mitmekümne kuni sadade miljonite dollaritega, mille vahemikku jäävad kosmoserakettide maksumused.

6.2 SOOVITUSED NANOSATELLIITIDE ARENDAMISEKS EESTIS

Eesti tudengisatelliidiprogrammi peamised eesmärgid on hariduslikud, teaduslikud ja teadust populariseerivad. Hariduslike eesmärkide saavutamiseks tuleb jätkata probleemipõhist õpet, mis tähendab tudengite enda poolt arendatud nanosatelliite ja nende alamsüsteeme. Kursuste raames satelliidi arendamine oleks ka kasulik, sest see võimaldab kaasata rohkem inimesi. Samas ei tohi pikaajaline aktiivne projektis osalemine tahaplaanile jääda, kuna just see arendab üldoskuseid, näiteks meeskonnatöö-, suuline väljendus-, juhtimis- ja probleemilahendusoskuseid.

Konkurentsivõimelise teaduse tegemisel tuleks keskenduda missioonile ja võimalikult palju nanosatelliidi alamsüsteeme sisse osta. See on osaliselt vastuolus hariduslike eesmärkidega, aga innovaatiline missioon vajab tõenäoliselt ka oma arendusi. Ressursside säästmiseks oleks siiski mõistlik osta mõningaid süsteeme.

Arendusprotsessi tuleb kiirendada. ESTCube-1 5 aastat kestnud arendamine on liiga pikk ja sellele lisandub veel 1-2 aastat satelliidi orbiidil opereerimise faasi, mille jooksul jätkub ka tarkvara arendamine ning andmete analüüs. Parem arendamisperiood oleks 2-3 aastat, sest tehnoloogia areneb kiiresti ja tudengid vahetuvad. Osalemine nanosatelliidi projektis kogu satelliidi arendamise protsessi vältel on inimesele palju arendavam, võrreldes ainult lõputöö tegemisega ühes kitsas valdkonnas. Lühem arendamisperiood vajab missioonide planeerimise ja analüüsi ning süsteemiinseneride kompetentside arendamist, et paremini näha ja mõista tervikpilti ning läbi selle projekte efektiivsemalt juhtida.

Tuleb jälgida, et Eestis arendatavad satelliitide alamsüsteemide tehnoloogiad oleks konkurentsivõimelised ka maailmas arendamisel olevate nanosatelliitide tehnoloogiatega. Kuna ESTCube eksperimendid on pärit partneritelt ja arendamisest võtab osa üha enam tasustatud töötajaid, siis tipptasemel publikatsioonide jaoks tuleb olla maailmatasemel. Seni on satelliidi alamsüsteemide arendamisel lähtunud peamiselt missioonist ja eksperimendist tulenevatest nõuetest.

6.3 SOOVITUSED NANOSATELLIITIDE VALDKONNA ARENDAMISEKS

Uuringu tulemustena saab tuua järgmised soovitusel nanosatelliitide valdkonnas tegutsevatele erinevatele osapooltele, kelleks on ettevõtted, ülikoolid, Euroopa Komisjon ja ESA.

1. Pikaajaline vabatahtlik või tasustatud projektis osalemine omab palju suuremat mõju kõikvõimalikele üldistele oskustele, võrreldes ühe semestri pikkuste kursustega.
2. Nanosatelliidi missiooni eesmärgid mõjutavad tudengite arvu, motivatsiooni ja projektis osalemise pikkust, ehk teisisõnu tudengid on altimad töötama huvitavate missioonide kallal.
3. Optimaalne ülikoolide nanosatelliitide projekti pikkus on 3 aastat, sest kui see kestab kauem, siis tudengite arv hakkab langema.
4. Riistvara ja tarkvara lahenduste ning kogemuste avalik jagamine on väga kasulik uutele nanosatelliitide projektidele. Infovahetamiseks tuleks luua jätkusuutlikud ülemaailmsed või Euroopa nanosatelliitide teadmiste võrgustikud, näiteks avalikud andmebaasid.
5. Tuleviku nanosatelliitide Kuu ja planeetide vahelised missioonid on tehnoloogiliselt võimalikud ja neist võivad saada innovatsiooni mootorid.
6. Tugevate interdistsiplinaarsete meeskondade loomine, kus oleks tudengeid ka teistest valdkondadest, võib viia ka suurema arvu ettevõtete tekkimiseni.
7. Vaja on paremaid üles saatmise võimalusi suure eesmärgiga nanosatelliitide missioonidele. Euroopas tuleks alata võistlus, et leida lahendusi ülemaailmselt olulistele probleemidele, kasutades nanosatelliite, ja pakuda võitjatele tasuta üles saatmise võimalusi.
8. Tuleks hakata ka doteerima riikide parimate või Euroopa hariduslike nanosatelliitide üles saatmist. See tõstab satelliitide kvaliteeti, sest doteeritud startidele tuleb kandideerida ja see omakorda tekitab jätkusuutliku kosmosetehnoloogia kõrghariduse andmise Euroopas.
9. Enamus nanosatelliite kasutab amatöörradio sagedusi, aga see ei võimalda areneda ärilisteks missioonideks. Vabad amatöörradio sagedused on ka sisuliselt otsas, aga nanosatelliitide arv suureneb. Satelliitide raadiosageduste koordineerimise protsess on aga mõeldud suurte satelliitide jaoks ja ei sobi kiirelt arendavatele nanosatelliitidele. Tuleks aktiivselt toetada alternatiivseid võimalusi nanosatelliitide andmesideks, nagu näiteks kasutada Iridium satelliitide telekommunikatsiooni teenuseid ja kehtestada nanosatelliitide sageduste koordineerimise jaoks Euroopa Liidus eraldiseisev protsess.

10. Nanosatelliitide arvu kasvu tõttu tuleb hakata arvesse võtma kosmoseprügi ohtu nanosatelliitidele ja mitte-töötavatelt nanosatelliitidelt teistele satelliitidele. Euroopa projektid toetuvad Ameerika Ühendriikide Kaitseväge satelliitide jälgimise andmetele ja kosmoseprügi kokkupõrgete ennustamisele, aga tuleks luua Euroopa teenus satelliitide jälgimiseks.
11. Euroopa raketistartide turg on nanosatelliitide mõistes alakoormatud. Ainult Vega raketiga on saadetud nanosatelliite kosmosesse, aga seda ka mitte kõigil lendudel ning kokku vähem kui 10 nanosatelliiti. See tähendab, et Euroopa nanosatelliitide arendajad peavad kasutama välismaiseid raketistartide teenuseid. Võrdluseks, kõik peamised USA kosmoseraketid on võimelised toetama kuupsatelliitide üles saatmist. Tuleks paremini ära kasutada Euroopa raketide potentsiaal ja lisaks luua uus teenus saatmaks nanosatelliite maalähedaselt orbiidilt kaugemale.

7 KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli kirjeldada projekti NANOSAT raames võimalikke tulevikustsenaariume nanosatelliitide valdkonnas ja nende põhjal anda soovitusi Eesti tudengisatelliidiprogrammi arendamiseks. Selle eesmärgi saavutamiseks tehti järgnevad sammud.

1. Viidi läbi mitmeosaline uuring nanosatelliitide arendamise hetkeseisust maailmas. Aastal 2013 saadeti orbiidile 86 nanosatelliiti, mis on 3 korda rohkem kui varasemal aastal ning sel aasta võib kosmosesse viidud nanosatelliitide arv ulatuda üle 100. Kokku leiti 572 nanosatelliidi projekti, millest 55% on arendatud Ameerika Ühendriikides ja 22% Euroopas. Euroopa on küll teisel kohal, aga siiski USAst kaugel maas ning see vahe suureneb.
2. Uuriti nanosatelliidi projektide seost kõrgharidusega, innovatsiooniga ja teaduse populariseerimisega. Suurem osa nanosatelliite arendatakse hariduslikul eesmärgil ülikoolides ja on ka ettevõtteid, kus nende abil treenitakse uusi töölisi. Ülikoolides suurendavad nanosatelliitide projektid ettevõtlikust ja uute kõrgtehnoloogiliste ettevõtete loomist. See on tõenäolisem, kui inimesed on projektides osalised pikka aega, võrreldes semestri pikkuste kursusetöödega. Ettevõtted ja kosmoseagentuurid kasutavad nanosatelliite uute innovaatiliste tehnoloogiate demonstreerimiseks kosmoses. Paljudes riikides on nanosatelliidid ka esimesed satelliidid ja omavad suurt rolli teaduse populariseerimisel.
3. Kirjeldati tehnoloogiaid, mille kiire areng on eelduseks nanosatelliitide mitmekülgses kasutamiseks. Nende hulka kuuluvad näiteks rakettmootorid, paaris lendamine, kiirem andmeside ja lahti pakkivad teleskoobid, aga ka kõikide satelliidi alamsüsteemide edasiarendamine.
4. Kirjeldati kosmosetehnoloogia rakendusi ja ärimudeleid, mille arengut võivad nanosatelliidid olulisel määral toetada. Nende hulka kuuluvad näiteks nanosatelliitide võrgustikud Maa kaugseireks, asteroidide kaardistamine ja kaevandamine ning uute tehnoloogiate demonstreerimine orbiidil.
5. Koostati ja esitati veebruaris 2014. a. Euroopa Komisjonile kaks raportit nanosatelliitide arendamisest ja potentsiaalsetest kasutusvõimalustest.

8 NANOSATELLITE TECHNOLOGY DEVELOPMENT TRENDS

The goal of this Master's thesis was to describe possible future scenarios in the field of nanosatellites and based on that give recommendations for the next missions of Estonian Student Satellite Programme. Nanosatellites are very small satellites with mass up to 10 kg and their number and technological capabilities are increasing rapidly.

Estonia started its own Student Satellite Programme in 2008 with 1.05 kg ESTCube-1 that was launched on 7th May 2013 from French Guiana. Now it is time to start planning the next satellite missions of Estonia. For that it is necessary to take into account the fast progress of nanosatellite technology development. This requires to map existing and planned nanosatellite projects and technology trends. A total of 572 nanosatellites were identified out of which 55% are from USA and 22% are from Europe.

European Commission 7th Framework Programme project NANOSAT started in January 2013, which purpose is to show how nanosatellites could be used to support the implementation of European Space Policy and the research was done in relation to that project.

In order to reach the goal of this Master's thesis the following tasks were done.

1. Several step research about the state of nanosatellite development in the world.
2. In 2013 86 nanosatellites were launched which is 3 times more than in the previous year and it is expected to be over 100 nanosatellites in 2014.
3. Nanosatellite projects relation to higher education, innovation and space outreach was researched. More than 62% of nanosatellites are developed with educational purposes.
4. Nanosatellite technologies were described which will enable many new useful applications, for example new propulsion systems, formation flying and deployable telescopes.
5. Space technology applications and business models were described which will be enabled or can be supported by using nanosatellites. Some of them are Earth observation, asteroid mining and mapping and in-orbit technology demonstrations.
6. Two reports about the state of nanosatellite development and potential applications were submitted to European Commission in February 2014 as part of NANOSAT project deliverables.

1. E. Kulu, A. Slavinskis, U. Kvell, M. Pajusalu, H. Kuuste, I. Sünter, E. Ilbis, T. Eenmäe, K. Laizans, A. Vahter, E. Eilonen, J. Kalde, P. Liias, A. Sisask, L. Kimmel, V. Allik, S. Lätt, and M. Noorma, "ESTCube-1 nanosatellite for electric solar wind sail demonstration in low Earth orbit," konverentsil *International Astronautical Congress (IAC)*, Peking, Hiina, 2013.
2. E. Kulu, A. Slavinskis, J. Viru, R. Valner, and H. Ehrpais, "Lessons learned of ESTCube-1 Attitude Determination and Control System (ADCS)," konverentsil *5th European CubeSat Symposium*, Brüssel, Belgia, 2013.
3. E. Kulu, "ESTCube-1 nanosatellite for Electric Solar Wind Sail technology demonstration in low Earth orbit," konverentsil *Baltic Applied Astroinformatics and Space data Processing (BAASP)*, Ventspils, Läti, 2013.
4. S. Lätt, A. Slavinskis, E. Ilbis, U. Kvell, K. Voormansik, and E. Kulu, "ESTCube-1 nanosatellite for electric solar wind sail in-orbit technology demonstration," *Proceedings of Estonian Academy of Sciences* (2014).
5. A. Slavinskis, E. Kulu, J. Viru, R. Valner, H. Ehrpais, T. Uiboupin, M. Järve, E. Soolo, J. Envall, I. Sünter, H. Kuuste, U. Kvell, J. Kalde, K. Laizans, E. Ilbis, T. Eenmäe, R. Vendt, K. Voormansik, I. Ansko, V. Allik, S. Lätt, and M. Noorma, "Attitude determination and control for centrifugal tether deployment on the ESTCube-1 nanosatellite," *Proceedings of Estonian Academy of Sciences* (2014).
6. A. Slavinskis, U. Kvell, E. Kulu, I. Sünter, H. Kuuste, S. Lätt, K. Voormansik, and M. Noorma, "High spin rate magnetic controller for nanosatellite," *Acta Astronautica* (2014).
7. M. Noorma, E. Kulu, A. Slavinskis, M. Pajusalu, U. Kvell, and S. Lätt, "Estonian Student Satellite Program," konverentsil *International Astronautical Congress (IAC)*, Peking, Hiina, 2013.
8. A. Slavinskis, U. Kvell, E. Kulu, T. Scheffler, S. Lätt, and M. Noorma, "Magnetic attitude control algorithms for ESTCube-1," konverentsil *International Astronautical Congress (IAC)*, Napoli, Itaalia, 2012.
9. G. Krebs, "Gunter's Space Page" (2013), <http://space.skyrocket.de/>.
10. Microcom Systems Ltd, "Satellite on the net" (2014.05.01, 2014), <http://www.satelliteonthenet.co.uk>.
11. ESA (European Space Agency), "eoPortal Satellite Missions Database" (2014), <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.

12. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "CubeSat Launch Initiative", 2014, http://www.nasa.gov/directorates/heo/home/CSLI_selections.html.
13. Wikipedia, "List of CubeSats" (2014), http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CubeSats.
14. IARU (International Amateur Radio Union), "Amateur Satellite Frequency Coordination", <http://www.amsatuk.me.uk/iaru/index.php>.
15. J. A. Larsen and C. Zhou, "On Student Motivation in a Problem and Project-Based Satellite Development and Learning Environment," (2013).
16. J. A. Larsen and J. D. Nielsen, "Development of Cubesats in an Educational Context," (2011).
17. M. W. Smith, "Enhancing undergraduate education in aerospace engineering and planetary sciences at MIT through the development of a CubeSat mission," (2011).
18. L. Alminde, M. Bisgaard, D. Vinther, T. Viscor, and K. Østergard, "Educational Benefits From the AAU-CubeSat Student Satellite Project," (2003).
19. L. Alminde, "Educational Value and Lessons Learned from the AAU-CubeSat Project," (2003).
20. M. W. Swartwout, "Significance of Student-Built Spacecraft Design Programs, It's Impact on Spacecraft Engineering Education over Last Ten Years," (2011).
21. M. W. Swartwout, "The Promise of Innovation from University Space Systems: Are We Meeting It," (2009).
22. M. Noorma, "Five years of space education and outreach in Estonia," *konverentsil 5th European CubeSat Symposium*, Brüssel, Belgia, 2013.
23. M. Cho and H. Masui, "Nano-satellite Development Project and Space Engineering Education at Kyushu Institute of Technology," (2013).
24. S. Nakasuka, N. Sako, H. Sahara, Y. Nakamura, T. Eishima, and M. Komatsu, "Evolution from education to practical use in University of Tokyo's nano-satellite activities," (2009).
25. R. Martinez, "ETSIT-UPM Experiences in Hands-on Nanosatellite Activities," (2012).
26. A. Denis, J. Pisane, J. Verly, and G. Kerschen, "Educational Assessment of Four Years of CubeSat Activities at the University of Liege, Belgium," (2011).
27. J. Lee, S. Ahn, C. Gi-Hyuk, and S.-H. Han, "CubeSat and HPA Program for Motivating Students and the General Public in the Republic of Korea," (2013).

28. T. E. Hevers, E. S. Daehler, and M. A. Peck, "Applying University Small Satellite Program Lessons to a Career in the Aerospace Industry," konverentsil *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
29. D. Voss, "Educational Programs: investment with a large return," konverentsil *26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2012.
30. D. Voss, J. Clements, K. Cole, M. Ford, C. Handy, and A. Stovall, "Real Science, Real Education: The University Nanosat Program," konverentsil *25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2011.
31. P. Platzer, J. Cappaert, J. Spark, and M. Kane, "Funding a CubeSat on Kickstarter," (2013).
32. D. Schor, G. Linton, and W. Kinsner, "Student-led Outreach Through a University Nanosatellite," (2013).
33. J. Grande, R. Birkeland, T. Lindem, R. Schlanbusch, T. Houge, S. V. Mathisen, and K. Dahle, "Educational Benefits and Challenges for the Norwegian Student Satellite Program " konverentsil *64th International Astronautical Congress*, Peking, Hiina, 2013.
34. P. Sundaramoorthy and A. Cervone, "How Can a Group of 3rd Year University Students Design a Real Nanosatellite? A Case Study at Delft University of Technology," konverentsil *International Astronautical Congress*, 2013.
35. W. Ley, K. Wittmann, and W. Hallmann, *Handbook of Space Technology* (John Wiley & Sons Ltd., 2009).
36. California Polytechnic State University, "CubeSat Design Specification," (2014).
37. SpaceWorks, "Nano / Microsatellite Market Assessment," (2014).
38. Z. Manchester, "KickSat - Your Personal Spacecraft in Space", <https://www.kickstarter.com/projects/zacinaction/kicksat-your-personal-spacecraft-in-space/posts>.
39. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "Vanguard-1", <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1958-002B>.
40. G. Krebs, "Gunter's Space Page - OSCAR-1", http://space.skyrocket.de/doc_sdat/oscar-1.htm.
41. Surrey Satellite Technology, "SNAP-1", <http://www.sstl.co.uk/Missions/SNAP-1--Launched-2000/SNAP-1/SNAP-1--The-Mission>.
42. S. W. Janson and H. Helvajian, *Small Satellites: Past, Present, and Future* (2009).

43. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "Bigelow Spacecraft Carries NASA GeneBox to Orbit" (2006), <http://www.nasa.gov/centers/ames/multimedia/images/2006/genebox.html>.
44. Aalborg University, "AAU CubeSat", <http://www.space.aau.dk/cubesat/>.
45. L. Alminde, M. Bisgaard, D. Vinther, T. Viscor, and K. Z. Østergard, "The AAU-CubeSat Student Satellite Project: Architectural Overview and Lessons Learned," konverentsil IAC, 2004.
46. Planet Labs, "Dove satellite" (2013), <http://www.planet.com/assets/themes/planet/images/homepage-carousel/slide2.jpg>.
47. W. Marshall, "Planet Labs Remote Sensing Satellite System," konverentsil *CubeSat Developers Workshop 2013*, Logan, Utah, 2013.
48. H. Song, "DIY Satellite" (2013), http://opensat.cc/download/DIYSatellite_en.pdf.
49. N. Fishwick, "Introducing LunchSat: A unique hands-on learning initiative", <http://www.thinkingwriting.qmul.ac.uk/wishees/collections/employment/Astrium%20Conference%20Paper%20and%20Leaflet/PDFs/58102.pdf>.
50. C. P. Bridges, S. Kenyon, C. I. Underwood, and M. N. Sweeting, "STRaND: Surrey Training Research and Nanosatellite Demonstrator," konverentsil *1st IAA Conference on University Satellite Mission and CubeSat Workshop*, Rooma, Itaalia, 2011.
51. Southern African Amateur Radio Satellite Association (SA AMSAT), "DynaCube to Explore the South Atlantic Anomaly" (2013), <http://www.amsatsa.org.za/DynaCube.htm>.
52. G. L. Skrobot and R. Coelho, "ELaNa - Educational Launch of Nanosatellite," konverentsil *26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2012
53. ISIS (Innovative Solutions In Space), "ISIS History" (2013), <http://www.isispace.nl/cms/index.php/2011-07-20-09-31-21/isis-history>.
54. GomSpace, "Company Introduction", <http://gomspace.com/index.php?p=profile>.
55. ESA (European Space Agency), "ESA seeks software innovators for supercharged orbiting laboratory," (2013).
56. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "PhoneSat" (2013), <http://www.nasa.gov/offices/oct/home/PhoneSat.html>.
57. Nanosatisfy, "ArduSat - Your Arduino Experiment in Space" (2012), <http://www.kickstarter.com/projects/575960623/ardusat-your-arduino-experiment-in-space>.
58. AMSAT-UK, "FUNcube - UK Amateur Radio Educational Satellite" (11, 2013), http://funcubetest2.files.wordpress.com/2011/02/funcubeinfosheet_nov2013_2-sides.pdf.

59. Tethers Unlimited, "SunMill Array" (2014), http://tethers.com/SpecSheets/Brochure_SunMillArray.pdf.
60. Clyde Space, "Deployable CubeSat Solar Panels" (2013), http://www.clyde-space.com/cubesat_shop/solar_panels_-_deployable.
61. F. Santoni, F. Piergentili, G. P. Candini, M. Perelli, A. Negri, and M. Marino, "Development of a Steerable Deployed Solar Array System for Nanospacecraft," *konferentsil International Astronautical Congress*, Beijing, 2013.
62. J. Mueller, R. Hofer, and J. Ziemer, "Survey of propulsion technologies applicable to CubeSats," (2010).
63. V. Ethier, N. Orr, S. Armitage, N. Roth, B. Risi, and R. E. Zee, "Development of a CubeSat Water Electrolysis Propulsion System," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
64. M. Tsay, D. Lafko, J. Zwahlen, and W. Costa, "Development of Busek 0.5N Green Monopropellant Thruster," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
65. D. Spence, E. Ehrbar, N. Rosenblad, and N. Demmons, "Electrospray Propulsion Systems for Small Satellites," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
66. V. Lappas, T. Harle, A. Knoll, P. Shaw, P. Bianco, and M. Perren, "Micro Electric Propulsion Technology for Small Satellites: Design: Testing and In-Orbit Operations," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
67. M. Keidar, S. Haque, T. Zhuang, A. Shashurin, D. Chiu, G. Teel, E. Agasid, O. Tintore, and E. Uribe, "Micro-Cathode Arc Thruster for PhoneSat Propulsion," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
68. G. Guillois, T. Dehaene, T. Sarrazin, and E. Peragin, "X Band Downlink for CubeSat - From Concept to Prototype," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
69. J. A. King, J. Ness, G. Bonin, M. Brett, and D. Faber, "Nanosat Ka-Band Communications - A Paradigm Shift in Small Satellite Data Throughput," *konferentsil 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
70. S. W. Janson and R. P. Welle, "The NASA Optical Communication and Sensor Demonstration Program," *konferentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.

71. G. Moore, W. Holemans, A. Huang, J. Lee, M. McMullen, J. White, R. Twiggs, B. Malphrus, N. Fite, D. Klumpar, E. Mosleh, K. Mashburn, D. Wilt, J. Lyke, S. Davis, W. Bradley, T. Chiasson, J. Heberle, and P. Patterson, "3D Printing and MEMS Propulsion for the RAMPART 2U CubeSat," *konverentsil 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2010.
72. ICEYE, (2014), <http://iceye.fi/>.
73. A. Gutierrez-Nava, O. Ponce, F. Lopez-Dekker, A. Patyuchenco, M. Younis, G. Krieger, A. Reigber, A. Moreira, E. Vicente-Vivas, F. Ocampo-Torres, and E. Pachecho, "TOPMEX-9 Distributed SAR Mission Employing Nanosatellite Cluster," *konverentsil 63rd International Astronautical Congress*, 2012.
74. Tethers Unlimited, "KRAKEN Robotic Arm" (2014), http://www.tethers.com/SpecSheets/Brochure_KRAKEN.pdf.
75. E. F. Agasid, K. Ennico-Smith, and A. T. Rademacher, "Collapsible Space Telescope (CST) for Nanosatellite Imaging and Observation," *konverentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
76. K. Shimizu, "University of Tokyo Nano Satellite Project PRISM," *konverentsil 27th International Symposium on Space Technology and Science*, 2009.
77. P. Janhunen, "Electrostatic Plasma Brake for Deorbiting a Satellite," *Journal of Propulsion and Power* **26**(2010).
78. G. Bonin, J. Hiemstra, T. Sears, and R. E. Zee, "The CanX-7 Drag Sail Demonstration Mission - Enabling Environmental Stewardship for Nano- and Microsatellites," *konverentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
79. V. Lappas, "Gossamer Systems for Satellite Deorbiting: The Cubesail and DEORBITSAIL Missions" (2012), <http://deorbitsail.com/media/files/GSF%20Keynote%2027.4.12%20Final%202%20no%20cli ps.pdf>.
80. A. Beattie, K. Sarda, D. Kekez, and R. E. Zee, "AISSAT-1: In-Orbit Verification of the Generic Nanosatellite Bus Platform " *konverentsil 62nd International Astronautical Congress*, 2011.
81. ISIS (Innovative Solutions In Space), "TRITON Missions" (2013), <http://www.isispace.nl/cms/index.php/projects/triton-missions>.
82. Los Alamos National Laboratory, "LANL Launches Four Tiny Satellites into Space," (2010).

83. J. Guo, J. Bouwmeester, and E. Gill, "From Single to Formation Flying CubeSats: An Update of the Delfi Programme," *konverentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
84. G. Bonin, N. Orr, S. Armitage, N. Roth, B. Risi, and R. E. Zee, "The CanX-4&5 Mission: Achieving Precise Formation Flight at the Nanosatellite Scale " *konverentsil 64th International Astronautical Congress*, Beijing, 2013.
85. Surrey Satellite Technology, "STRaND-2 Docking Nanosatellite" (2014), <http://www.sssl.co.uk/STRaND-2-docking-nanosatellite>.
86. M. W. Smith, S. Seager, C. M. Pong, J. S. Villasenor, G. R. Ricker, D. W. Miller, M. E. Knapp, G. T. Farmer, and R. Jensen-Clem, "ExoplanetSat: Detecting transiting exoplanets using a low-cost CubeSat platform," (2010).
87. H. Butcher, "Thoughts on Astrophysics with nano/6U CubeSats," *konverentsil 6U CubeSat Low Cost Space Missions Workshop*, 2012.
88. C. Kitts, K. Ronzano, R. Rasay, I. Mas, Phelps Williams, P. Mahacek, G. Minelli, J. Hines, E. Agasid, C. Friedericks, M. Piccini, M. Parra, Linda Timucin, C. Beasley, M. Henschke, E. Luzzi, N. Mai, M. McIntyre, R. Ricks, David Squires, C. Storment, J. Tucker, B. Yost, G. Defouw, and A. Ricco, "Flight Results from the GeneSat-1 Biological Microsatellite Mission," *konverentsil 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2007.
89. A. C.-R. A. Costa, "Deorbiting and Reentry of GAMASAT," (University of Porto, 2013).
90. J. Vannitsen, B. Segret, J.-J. Miao, and J.-C. Juang, "A Free-Return CubeSat Mission to prepare the Human Exploration of Mars," *konverentsil 5th European CubeSat Symposium*, Brussels, 2013.
91. B. Badders, T. Hill, J. Straub, J. Berk, N. J. Long, and J. Schiralli, "Small Spacecraft Exploration of Uranian Moon," *konverentsil 44th Lunar and Planetary Science Conference*, 2013.
92. A. Klesh, J. Baker, J. Castillo-Rogez, L. Halatek, N. Murphy, C. Raymond, B. Sherwood, J. Bellardo, J. Cutler, and G. Lightsey, "INSPIRE: Interplanetary NanoSpacecraft Pathfinder in Relevant Environment," *konverentsil 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
93. Vermont Technical College, "CubeSat Lunar Lander/Orbiter Project" (2013), <http://www.cubesatlab.org/>.

94. J. Mueller, "Asteroid Prospector," konverentsil *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
95. Deep Space Industries, "Deep Space Industries" (2014), <http://deepspaceindustries.com/>.
96. Planetary Resources, "Planetary Resources" (2014), <http://www.planetaryresources.com/>.
97. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "Miniature Autonomous Extravehicular Robotic Camera (Mini-AERCam)" (2002), <http://aercam.jsc.nasa.gov/aercam.pdf>.
98. C. Underwood, S. Pellegrino, V. Lappas, C. Bridges, B. Taylor, S. Chhaniyara, T. Theodorou, P. Shaw, M. Arya, J. Breckinridge, K. Hogstrom, K. D. Patterson, J. Steeves, L. Wilson, and N. Horri, "Autonomous Assembly of a Reconfigurable Space Telescope (AAReST)," konverentsil *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
99. D. Werner, "Planet Labs Unveils Plan To Launch 28 Nanosats on Antares' 1st Cargo Run" (06 11, 2013), <http://www.spacenews.com/article/civil-space/35980planet-labs-unveils-plan-to-launch-28-nanosats-on-antares-1st-cargo-run>.
100. von Karman Institute, "QB50 Project" (2014), <https://www.qb50.eu/>.
101. NASA (National Aeronautics and Space Administration), "Edison Demonstration of Smallsat Networks (EDSN)" (2013), http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small_spacecraft/edsn.html#.UpMwcMRMh8E.
102. M. Barschke, Z. Yoon, and K. Brieß, "TUBIX – The TU Berlin Innovative Next Generation Nanosatellite Platform," konverentsil *International Astronautical Congress*, Beijing, 2013.
103. M. Unterberger, P. Romano, M. Bergmann, R. Kuschnig, and O. Koudelka, "Experience in Commissioning and Operations of the Brite-Austria Nanosatellite Mission," konverentsil *64th International Astronautical Congress*, Peking, Hiina, 2013.
104. S. Padmanabhan, S. Brown, P. Kangaslahti, R. Cofield, D. Russell, R. Stachnik, J. Steinkraus, and B. Lim, "A 6U CubeSat Constellation for Atmospheric Temperature and Humidity Sounding," konverentsil *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
105. P. Wloszek, R. Glumb, R. Lancaster, C. Lietzke, S. McCarty, J. Arlas, B. Heidt, M. Ramirez, and V. Singh, "FTS CubeSat Constellation Providing 3D Winds," konverentsil *27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.

106. V. Chirayath and B. T. Mahlstedt, "HiMARC3D (High-speed, Multispectral, Adaptive Resolution Stereographic CubeSat Imaging Constellation)," *konverentsil 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2012.
107. ESA (European Space Agency), "Global Educational Network for Satellite Operations (GENSO)",
http://www.esa.int/Education/Global_Educational_Network_for_Satellite_Operations.
108. Markets and Markets, "Nanosatellite and Microsatellite Market - Worldwide Market Forecast (2014 - 2019)," (2014).
109. Berlin Space Technologies, "iADCS-100" (2014), <http://www.berlin-space-tech.com/index.php?id=43>.
110. University of Toronto Institute for Aerospace Studies Space Flight Laboratory, "Low-Cost Launch Service" (2014), http://utias-sfl.net/?page_id=233.
111. NanoRacks, "Smallsat Deployment," (2014).

LISA 1. KÜSITLUSED

Veebiküsitlus

ORGANISATIONAL INFORMATION

Name of organisation

Contact person email

Number of nanosatellite missions developed, under development or planned in 5 years

What are your organization's core competences in the field of nanosatellite development?

☐ Mission planning and system design

☐ On-board data handling

☐ Specific payloads

☐ Attitude control

☐ Communication (ground-satellite)

☐ Deorbit mechanism,

☐ Power systems

☐ Deployable mechanics

☐ On-board computers and operating systems

☐ Others _____

What would be your recommendations regarding future orientation of programmatics, i.e. technology programmes and policy support at the national or international level to enable a wider development of innovative space applications based on nanosatellite contributions?

PROJECT INFORMATION

Name of the mission

Contact person for the project

Email of the contact person

Project start year:

Project end year:

Nanosatellite launch year:

Type of the nanosatellite mission

☐ 1U CubeSat

☐ 3U CubeSat

☐ other nanosatellite (1-10 kg)

☐ multiple satellites

☐ 2U CubeSat

☐ 6U CubeSat

☐ other picosatellite (below 1 kg)

☐ other _____

Please check the categories which describe the orbit of this mission

☐ Low Earth Orbit

☐ Polar Orbit

☐ Highly Elliptical Orbit

☐ other

Primary ground segment location (country)

Please check the categories which are relevant to your mission

☐ educational

☐ scientific

☐ commercial

☐ science popularization

☐ outreach

Please check the categories, which are relevant to the field of the mission

☐ Earth observation

☐ scientific

☐ communication

☐ technology demonstration

☐ other

What is your mission statement?

Please check all the categories that describe the mission

☐ we develop the mission alone

☐ we develop the satellite bus

☐ we have a consortium to develop this mission

☐ we develop the payload

☐ we lead a consortium to develop the mission

Please indicate the approach to the subsystem development

	COTS	own development	from a partner	other
Power	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Communication	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Attitude Determination and Control	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Command and Data Handling	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Structure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ground segment	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mission Control Software	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Please list the partners of the mission (if any)

What could be the potential educational, outreach, scientific or commercial applications of your mission results in the future?

Please describe your long term ambitions. What difference will the success of this mission make to the future of your organisation, space flight, scientific community, your country, mankind etc?

How many students have been involved in development of the mission (if any)?

How many staff members have been involved in development of the mission?

How many undergraduate or graduate theses have been produced?

How many doctoral dissertations have been or will be based on the mission?

Please estimate the number of international peer-reviewed articles, which are based on this mission

Please estimate the number of conference presentations, which are based on this mission.

How many technologies, developed for this mission, you have patented or expect to patent?

How many spin off companies have the participants of the mission established?

Please check the categories that describe best your approach towards the Public Relations of the project

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> we have a PR strategy | <input type="checkbox"/> we actively search for opportunities for media coverage |
| <input type="checkbox"/> we often produce press releases | <input type="checkbox"/> media coverage is not important for us |

Please estimate the total budget of your mission in euros (without launch)

Mission website

Kopenhaageni töötoa tagasisideküsitlus

1. Please rate different aspects of the Workshop?

4 3 2 1

Programme

Selection of speakers

Materials

Catering

Venue

Pre-advertisements

2. Please specify how did the Workshop meet your expectations?

4 3 2 1

Gather and share experiences of nanosatellites development

Consolidate the main actors in European nanosatellites landscape

Discuss the main benefits of investing in nanosatellite programmes

3. What are the major issues, which hinder nanosatellites development in Europe?

4. How can You make money with nanosatellites?

5. What are the major applications, which drive nanosatellite development?

6. Please propose joint nanosatellite initiatives and projects in Europe.

7. What is the methodology to engage students into satellite-building projects?

8. What are the different educational approaches used in student satellite programmes?

9. What are the best practices of using nanosatellites in science popularization?

10. How Your nanosatellites activities have supported entrepreneurship?

LISA 2. NANOSATELLIITIDE TABEL

Järgnevas tabelis on kõik töö käigus loodud andmebaasis olevad nanosatelliidid ja nende 5 põhilist tunnust. Satelliidid on sorteeritud riikide tähestikulises järjekorras. Tähemärk „f“ aastaarvu järel tähendab satelliidi hävinemist üleslennul ja TBA tähendab, et üles saatmise aastat pole veel välja kuulutatud.

Missiooni nimi	Organisatsioon	Organisat-siooni tüüp	Riik	Tüüp (U või mass)	Orbiidile saatmise aasta
CubeBug-1	Argentinian Ministry of Science, Technology and Productive Innovation, Satellogic	Agency	Argentina	2U	2013
CubeBug-2 (Manolito)	Argentinian Ministry of Science, Technology and Productive Innovation, Satellogic	Agency	Argentina	2U	2013
PehuenSat 1 (PO 63, Oscar 63)	National University of Comahue	University	Argentina	6 kg	2007
Antarctic Broadband Nanosatellite	Australian Space Research Program	Agency	Australia	6.82 kg	2014
i-INSPIRE	University of Sydney	University	Australia	2U	2016
i-INSPIRE II	University of Sydney	University	Australia	2U	2016
SUSat	University of Adelaide	University	Australia	2U	2016
UNSW-EC0	The University of New South Wales	University	Australia	2U	2016
GSat (Genso Test Satellite)	University of Applied Science Technikum-Wien	University	Austria	2U	2016
TUGSat 1	Austrian Space Program	Agency	Austria	7 kg	2013
UniBRITE (CanX 3A)	Austrian Space Program	Agency	Austria	7 kg	2013
LeSTAR	Lessius University College	University	Belgium	3U	TBA
OUFTI-1	University of Liège	University	Belgium	1U	2014
PICASSO	Belgian Institute for Space Aeronomy and the Royal Observatory of Belgium.	Institute	Belgium	3U	2016
QARMAN	VKI (von karman Institute)	Institute	Belgium	3U	2016
RESat	VKI (von karman Institute)	Institute	Belgium	2U	2016
14-BISat	Instituto Federal Fluminense	University	Brazil	2U	2016
AESP-14	Technological Institute of Aeronautics	University	Brazil	1U	2014
NANOSATC-BR1	Southern Regional Space Research Center (CRS)	Institute	Brazil	1U	2014
NANOSATC-BR2	Southern Regional Space Research Center (CRS)	Institute	Brazil	2U	TBA
UNOSAT 1	Universidade Norte do Paraná	University	Brazil	8.83 kg	2003f
CubeMessenger	BOREAS Space	University	Bulgaria	1U	TBA
AlbertaSat-1	AlbertaSat	University	Canada	3U	2016
CanX-1	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	1U	2003

CanX-2	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	3U	2008
CanX-4	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	7 kg	2014
CanX-5	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	7 kg	2014
CanX-6	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	6.5 kg	2008
CanX-7	University of Toronto Institute for Aerospace Studies	University	Canada	2U	2014
Consat-1	Concordia University	University	Canada	3U	2014
Consat-2	Concordia University	University	Canada	3U	idea
Ex-Alta 1	AlbertaSat	University	Canada	3U	2016
Lunette	UTIAS/SFL	University	Canada	6 kg	cancelled
T-sat1	University of Manitoba	University	Canada	3U	cancelled
T-sat1	University of Manitoba	University	Canada	3U	2015
YUend-1	York University	University	Canada	1U	2014
YUend-2	York University	University	Canada	1U	TBA
YUend-QB50	York University	University	Canada	2U	QB50
SUChAI	University of Chile	University	Chile	1U	TBA
BUAA-Picosat	Beihang University	University	China	2U	TBA
BUSAT-1	Beihang University	University	China	2U	QB50
LilacSat-1	Harbin Institute of Technology	University	China	2U	QB50
MEMS	Zhejiang University	University	China	1 kg	2007
NJUST-1	Nanjing University of Science and Technology	University	China	2U	QB50
STU-1	ShanghaiTech University	University	China	2U	2016
ZDPS 1 (Zheda Pixing)	Zhejiang University	University	China	2.5 kg	2007
ZDPS 1A-1 (1B) (Zheda Pixing)	Zhejiang University	University	China	3.5 kg	2010
ZDPS 1A-2 (1B) (Zheda Pixing)	Zhejiang University	University	China	3.5 kg	2010
TT 1 (Tiantuo 1)	National University of Defense Technology	University	China	9.3 kg	2012
COL-1 CubeSat Colombia	Universidada Distrital FJC	University	Colombia		TBA
Libertad-1	Sergio Arboleda University	University	Colombia	1U	2007
Libertad-2	Sergio Arboleda University	University	Colombia	3U	2014
Dspace	Costa Rica Institute of Technology (TEC),	University	Costa Rica	1U	2016
PilsenCUBE	University of West Bohemia	University	Czech Republic	1U	2013
AAUSAT	Aalborg University	University	Denmark	1U	2003
AAUSAT3	Aalborg University	University	Denmark	1U	2013
AAUSAT4	Aalborg University	University	Denmark	1U	2014
AAUSAT-II	Aalborg University	University	Denmark	1U	2008
DTUSat-1	Technical University of Denmark	University	Denmark	1U	2003
DTUSat-2	DTU Space	Institute	Denmark	1U	2014
GOMX-1	GomSpace ApS	Company	Denmark	2U	2013
MiniRomit 1	European Lunar Exploration Association	Company	Denmark	2U	TBA
NEE-01 Pegaso	Ecuadorian Space Agency	Agency	Ecuador	1U	2013

NEE-02 Krysaor	Ecuadorian Space Agency	Agency	Ecuador	1U	2013
EgyCubeSat-1	National Authority for Remote Sensing and Space Sciences	Institute	Egypt	1U	TBA
ESTCube-1	University of Tartu	University	Estonia	1U	2013
ESTCube-2	University of Tartu	University	Estonia	2U	2016
ESTCube-3	University of Tartu	University	Estonia	3U	2018
ET-SAT	Addis Ababa Institute of Technology (AAiT)	University	Ethiopia	2U	2016
Aalto-1	Aalto University	University	Finland	3U	2014
Aalto-2	Aalto University	University	Finland	2U	2016
EntrySat	ISAE Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace	University	France	2U	2016
Jumpsat	University of Toulouse	University	France	3U	2017
OGMS-SA	Université Paris-Est Creteil	University	France	3U	2016
ROBUSTA	University of Montpellier II	University	France	1U	2012
ROBUSTA-1B	University of Montpellier II	University	France	1U	2012
SAPTICARD	Laboratoire des technologies Innovantes	University	France	1U	2016
SAT-IP2	University of Picard	University	France	2U	2016
SpaceCube	Mines Paristech	University	France	2U	2016
Xcubesat	Ecole Polytechnique	University	France	2U	2016
BEESAT-1	Berlin Technical University	University	Germany	1U	2009
BEESAT-2	Berlin Technical University	University	Germany	1U	2013
BEESAT-3	Berlin Technical University	University	Germany	1U	2013
CAPE - MIRKA2	University of Stuttgart	University	Germany	3U	2014
Compass-1	Aachen University of Applied Sciences	University	Germany	1U	2008
Compass-2	Aachen University of Applied Sciences	University	Germany	3U	2016
Cuballute	Bundeswehr University Munich	University	Germany	3U	Idea
Deorbitsail	DLR	Agency	Germany	3U	2014
Heidelsat	Heidelberg University of Applied Sciences	University	Germany	1U	TBA
MOVE	Technical University of München	University	Germany	1U	2013
MOVE II	Technical University of München	University	Germany	2U	TBA
S-Net 2	TU Berlin	University	Germany	8 kg	2016
S-Net 3	TU Berlin	University	Germany	8 kg	2016
S-Net 4	TU Berlin	University	Germany	8 kg	2016
SOMP	Technische Universität Dresden	University	Germany	1U	2013
TUBSAT-N	Technische Universität Berlin	University	Germany	8.5 kg	1998
TUBSAT-N1	Technische Universität Berlin	University	Germany	3 kg	1998
UWE-1	University of Würzburg	University	Germany	1U	2005
UWE-2	University of Würzburg	University	Germany	1U	2009
UWE-3	University of Würzburg	University	Germany	1U	2013
UWE-4	University of Würzburg	University	Germany	1U	TBA
Wren	STADOKO UG	Company	Germany	PocketQub	2013
DUTHSat	Democritus University of Thrace	University	Greece	2U	2016
UPSat	University of Patras	University	Greece	2U	2016
MaSat-1	Budapest University of Technology and Economics	University	Hungary	1U	2012

MaSat-2	Budapest University of Technology and Economics	University	Hungary	TBA	TBA
S-Net 1	TU Berlin	University	Hungary	8 kg	2016
Azad-1	Maulana Azad National Institute of Technology	University	India	1U	2014
Jugnu	Indian Institute of Technology Kanpur	University	India	3U	2011
Jugnu-2	Indian Institute of Technology Kanpur	University	India	3U	TBA
Pratham	Indian Institute of Technology Bombay	University	India	7 kg	TBA
SMRSat	SRM University	University	India	10 kg	2011
SNSAT (Sathyabamasat)	Sathyabama University	University	India	2U	2014
StudSat-1 (Student Satellite-1)	Nitte Meenakshi Institute of Technology	University	India	1U	2010
STUDSAT-2A	Nitte Meenakshi Institute of Technology	University	India	10 kg	2014
STUDSAT-2B	Nitte Meenakshi Institute of Technology	University	India	10 kg	2014
Swayam COEP	College of Education Pune	University	India	1U	TBA
Anusat-2	Anna University	University	India	2U	2016
SEDSat-2	Students for the Exploration and Development of Space (SEDS)	Non-profit	Inter-national	1U	cancelled
Duchifat-1	Herzliya Science Centre	School	Israel	1U	TBA
Hoopoe	Herzliya Science Centre	School	Israel	2U	2016
InKlajn-1	Israel Aerospace Industries	Company	Israel	3U	TBA
SAMSON A	Israel Institute Of Technology	University	Israel	6U	2015
SAMSON B	Israel Institute Of Technology	University	Israel	6U	2015
SAMSON C	Israel Institute Of Technology	University	Israel	6U	2015
Aramis-C1	Polytechnical University of Torino	University	Italy	1U	TBA
AtmoCube	University of Trieste	University	Italy	1U	TBA
e-st@r	Polytechnic University of Turin	University	Italy	1U	2012
e-st@r-2	Polytechnic University of Turin	University	Italy	1U	2014
Lagrange-1 CubeSat	Polytechnical University of Torino	University	Italy	6U	idea
Max Valier	Max Valier Technical High School	School	Italy	10 kg	TBA
myPocketQub 391		University	Italy	PocketQub	cancelled
PicPoT	Polytechnic University of Turin	University	Italy	2.5 kg	2006f
QB50	University of Bologna	University	Italy	QB50	2016
Tigrisat	School of Aerospace Engineering of Rome	University	Italy	3U	TBA
UNICubeSat-GG	Sapienza University of Rome	University	Italy	1U	2012
Ursa Maior	University of Rome	University	Italy	3U	2016
Cubesat XI-IV	University of Tokyo	University	Japan	1U	2003
Cubesat XI-V	University of Tokyo	University	Japan	1U	2005
CUTE-1 (I)	Tokyo Institute of Technology	University	Japan	1U	2003
CUTE-1.7+APD	Tokyo Institute of Technology	University	Japan	1U	2006
CUTE-1.7+APD-2	Tokyo Institute of Technology	University	Japan	1U	2008
FITSat-1	Fukuoka Institute of Technology	University	Japan	1U	2012

HIT-Sat	Hokkaido Institute of Technology	University	Japan	2.7 kg	2006
HORYU-1	Kyushu Institute of Technology	University	Japan	1U	cancelled
HORYU-2	Kyushu Institute of Technology	University	Japan	7.1 kg	2012
HORYU-3	Kyushu Institute of Technology	University	Japan	3U	2014
Invader	Tama Art University	University	Japan	1U	2014
ITF-1 (YUI)	University of Tsukuba	University	Japan	1U	2014
KKS-1 (Kouku Kosen Satellite-1)	Metropolitan College of Industrial Technology	University	Japan	3.17 kg	2009
K-Sat, Hayato, Kagoshima Satellite	Kagoshima University	University	Japan	1U	2010
KSAT2	Kagoshima University	University	Japan	1U	2014
Negai-Star	Soka University	University	Japan	1U	2010
NEXUS	Nihon University	University	Japan	1U	TBA
OPUSAT	Osaka Prefecture University	University	Japan	1U	2014
PRISM	University of Tokyo	University	Japan	8.5 kg	2009
RAIKO	Tohoku and Wakayama Universities	University	Japan	2U	2012
SEEDS	Nihon University	University	Japan	1U	2006f
SEEDS-2	Nihon University	University	Japan	1U	2008
SPROUT	Nihon University	University	Japan	6.7 kg	2013
STARS-1	Kagawa University	University	Japan	10 kg	2009
STARS-2	Kagawa University	University	Japan	9kg	2014
Waseda-Sat2	Waseda University	University	Japan	1U	2010
We Wish	Meisei Electric Co.	Company	Japan	1U	2012
WNISAT 1 (Weather News Inc Satellite 1)	Weather News Inc.	Company	Japan	10 kg	2013
XI-IV	University of Tokyo	University	Japan	1U	2003
XI-V	University of Tokyo	University	Japan	1U	2005
Venta-1	University of Applied Sciences Bremen, OHB Systems	University	Latvia	7.5 kg	2014
LitSat-1	Lithuanian Space Federation; Space Science and Technology Institute	Institute	Lithuania	1U	2014
LituanicaSAT-1	Kaunas University of Technology	University	Lithuania	1U	2014
LituanicaSAT-2	Innovative Engineering Projects	Company	Lithuania	3U	2016
PiezoSat-1	Space Science and Technology Institute	Institute	Lithuania	3U	2016
InnoSAT	Universiti Sains Malaysia (USM), Universiti Teknologi Malaysia (UTM) and Universiti Malaysia Perlis (UniMAP).	University	Malaysia	3U	TBA
Pipit	Astronautic Technology (M) Sdn. Bhd. (satellite bus)	Institute	Malaysia	0.150 kg	TBA
DelFFi Delta	Delft University of Technology	University	Netherlands	3U	2016
DelFFi Phi	Delft University of Technology	University	Netherlands	3U	2016
Delfi-C3	Delft University of Technology	University	Netherlands	3U	2008
Delfi-n3Xt	Delft University of Technology	University	Netherlands	3U	2013
Triton-1	ISIS	Company	Netherlands	3U	2013
Triton-2	ISIS	Company	Netherlands	3U	2014

AISSat-1	University of Toronto Institute for Aerospace Studies Space Flight Lab	University	Norway	6 kg	2010
AISSat-2	University of Toronto Institute for Aerospace Studies Space Flight Lab	University	Norway	6 kg	2014
CubeSTAR	University of Oslo	University	Norway	2U	2014
HiNCube	Narvik University College	University	Norway	1U	2013
nCube-1	Norwegian University of Technology and Science (NTNU), Narvik University College (HiN) and the Agricultural University of Norway (NLH)	University	Norway	1U	2006
nCube-2	Norwegian University of Technology and Science (NTNU), Narvik University College (HiN) and the Agricultural University of Norway (NLH)	University	Norway	1U	2005
NUTS	Norwegian University of Science and Technology	University	Norway	2U	2014
ICube-1	Islamabad Institute of Science and Technology	Institute	Pakistan	1U	2013
Chasqui-I	Peru National University of Engineering	University	Peru	1U	cancelled
PUCP-Pocket	Universidad Católica del Perú	University	Peru	0.127 kg	2013
PUCPSat-1	Universidad Católica del Perú	University	Peru	1U	2013
UAP SAT-1	University Alas Peruanas	University	Peru	1U	2014
UAP SAT-2	University Alas Peruanas	University	Peru	2U	2016
UNSA-SAT1	National University of St Agustin of Arequipa	University	Peru	2U	2016
BRITE-PL-1	The Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences	Institute	Poland	6 kg	2013
BRITE-PL-2	The Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences	Institute	Poland	6 kg	2013
PW-Sat	Warsaw University of Technology	University	Poland	1U	2012
PW-Sat 2	Warsaw University of Technology	University	Poland	2U	2016
GamaSat	University of Porto and Tekever	University	Portugal	3U	2016
Goliat	Romanian Space Agency,	Agency	Romania	1U	2012
SamSat-1	Samara State Aerospace University	University	Russia	2U	TBA
SamSat-2	Samara State Aerospace University	University	Russia	2U	TBA
SamSat-3	Samara State Aerospace University	University	Russia	2U	idea
SamSat-2016	Samara State Aerospace University	University	Russia	2U	2016
TNS-0 (TEKh-42)	FSUE (Federal State Unitary Enterprise-meaning a 'government industry') / RSIDE (Russian Scientific Institute of Space Device Engineering),	Institute	Russia	5 kg	2005
NUS QB50	National University of Singapore	University	Singapore	2U	2016

VELOX-I N-Sat	Nanyang Technological University	University	Singapore	3U	cancelled
VELOX-P	Nanyang Technological University	University	Singapore	1U	TBA
VELOX-P2	Nanyang Technological University	University	Singapore	1U	2013
skCube	Slovak Organisation for Space Activities	Non-profit	Slovakia	1U	2016
Dynacube	Denel Dynamics	Company	South Africa	1U	2014
ZA-AeroSat	Cape Peninsula University of Technology	University	South Africa	3U	2016
ZACUBE-1	Cape Peninsula University of Technology	University	South Africa	1U	2013
ZACUBE-2	Cape Peninsula University of Technology	University	South Africa	3U	TBA
CINEMA-2 (KHUSAT 1)	Kyung Hee University	University	South Korea	3U	2013
CINEMA-3 (KHUSAT 2)	Kyung Hee University	University	South Korea	3U	2013
Deployable Sail	Chungnam National University	University	South Korea	3U	2014
HAUSat-1	Hankuk Aviation University	University	South Korea	1U	2006f
OSSI-1	(Open Source Satellite Initiative	Individual	South Korea	1U	2013
SNUSat-1	Seoul National University	University	South Korea	2U	2016
HumSat-D	University of Vigo	University	Spain	1U	2013
OPTOS (Optical Nanosatellite)	Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial	Agency	Spain	3U	TBA
OPTOS 2G	Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial	Agency	Spain	3U	TBA
Politech.1	Polytechnic University of Valencia	University	Spain	3U	2014
Qbito	Polytechnical University of Madrid	University	Spain	2U	2016
Sallesat-1	La Salle University	University	Spain	1U	TBA
Xatcobeo	University of Vigo	University	Spain	1U	2012
Munin	Swedish Institute of Space Physics	Agency	Sweden	6 kg	2000
CleanSpace One	Swiss Space Center	Institute	Switzerland	3U	2018
CubETH	Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)	Institute	Switzerland	1U	TBA
SwissCube-1	Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)	Institute	Switzerland	1U	2009
TISAT-1	University of Applied Sciences of Southern Switzerland	University	Switzerland	1U	2010
PACE	National Cheng Kung University	University	Taiwan	2U	TBA
PHOENIX	National Cheng Kung University	University	Taiwan	2U	2016
TARO	National Cheng Kung University	University	Taiwan	2U	TBA
Yamsat 1A	National Space Program Office's	Agency	Taiwan	1U	cancelled
Yamsat 1B	National Space Program Office's	Agency	Taiwan	1U	cancelled
Yamsat 1C	National Space Program Office's	Agency	Taiwan	1U	cancelled
ERPSat01	Sfax School of Engineering	University	Tunisia	1U	TBA
BeEagleSat	Istanbul Technical University	University	Turkey	2U	2016

ITUpSAT-1	Istanbul Technical University	University	Turkey	1U	2010
TurkSat-3USat	ITU (Istanbul Technical University)	University	Turkey	3U	2013
Delta-Dsat	Cranfield University	University	UK	2U	2016
FUNCube-1	AMSAT-UK (amateur radio satellite organisation)	Non-profit	UK	1U	2013
InflateSail	Surrey Space Centre	Company	UK	3U	2016
LunchSat	Astrium Ltd	Company	UK	3U	TBA
OSCAR-1	AMSAT-UK (amateur radio satellite organisation)	Non-profit	UK	4.5 kg	1961
OSCAR-2	AMSAT-UK (amateur radio satellite organisation)	Non-profit	UK	4.5 kg	1962
PLUME	University of Leicester	University	UK	1U	cancelled
Project BLAST	University of Southampton	University	UK	1U	2015
STRaND-1	Surrey Space Technology	Company	UK	3U	2013
STRaND-2A	Surrey Space Technology	Company	UK	3U	TBA
STRaND-2B	Surrey Space Technology	Company	UK	3U	TBA
UKube-1	United Kingdom Space Agency	Agency	UK	3U	2014
DneprCubeSat	Youth Aerospace Education National Center	Agency	Ukraine	2U	2016
KPI-SAU-1	National Technical University of Ukraine, Kiev Polytechnic Institute	University	Ukraine	2U	2016
PolyITAN-1	National Technical University of Ukraine	University	Ukraine	1U	TBA
Antelsat	Antel (Administración Nacional de Telecomunicaciones), FING-III (Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Instituto de Ingeniería Eléctrica)	University	Uruguay	2U	2014
\$50Sat (50-Dollarsat)	Morehead State University	University	US	PocketQub	2013
Aeneas	University of Southern California	University	US	3U	2012
AeroCube-1	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2006f
AeroCube-2	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2007
AeroCube-3	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2009
AeroCube-4	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2012
AeroCube-4a	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2012
AeroCube-4b	The Aerospace Corporation	Institute	US	1U	2012
AeroCube-5a	The Aerospace Corporation	Institute	US	1.5U	2013
AeroCube-5b	The Aerospace Corporation	Institute	US	1.5U	2013
Aggiesat-1	Texas A&M University	University	US	1U	cancelled
Aggiesat-2	Texas A&M University	University	US	1U	2009
Aggiesat-3	Texas A&M University	University	US	1U	cancelled
Aggiesat-4	Texas A&M University	University	US	1U	2014
ALICE	Air Force Institute of Technology's	University	US	3U	2013
ALL-STAR	University of Colorado at Boulder Colorado Space Grant Consortium	University	US	3U	2014
ANDESITE	Boston University	University	US	3U	TBA
ARAPAIMA	Embry-Riddle Aeronautical University	University	US	6U	TBA

ARC (Alaska Research CubeSat)	University of Alaska	University	US	1U	2014
ArduSat	Nanosatisfi LLC	Company	US	1U	2013
ArduSat 2	Nanosatisfi LLC	Company	US	1U	2014
ArduSat-X	Nanosatisfi LLC	Company	US	1U	2013
Argus	Saint Louis University	University	US	2U	2014
Arkyd-3	Planetary Resources	Company	US	3U	2014
Armadillo	University of Texas	University	US	3U	2014
Artemis Louise (Lightning)	Santa Clara University	University	US	0.5 kg	2000
Artemis Thelma (Thunder)	Santa Clara University	University	US	0.5 kg	2000
ASUSat 1	Arizona State University	University	US	6 kg	2000
AubieSat-1	Auburn University	University	US	1U	2011
AubieSat-2,3	Auburn University	University	US	3U	TBA
AubieSat-2,3	Auburn University	University	US	3U	TBA
BeakerSat 1	Morehead State University Space Science Center	University	US	PocketQub 2.5U (12.5 cm x 5 cm x 5 cm)	2013
BEVO 1 (DragonSat 1)	University of Texas at Austin	University	US	1U	2009
BEVO 2	University of Texas at Austin	University	US	3U	2014
Black Night 1	West Point Military Academy	University	US	1U	2013
CADRE	University of Michigan	University	US	3U	TBA
Caerus	University of Southern California	University	US	1U	2010
CAPE-1	University of Louisiana at Lafayette	University	US	1U	2007
CAPE-2	University of Louisiana at Lafayette	University	US	1U	2013
CeREs	NASA Goddard Space Flight Center	Agency	US	3U	TBA
ChargerSat-1	University of Alabama in Huntsville Space Hardware Club	University	US	1U	2013
ChargerSat-2	University of Alabama in Huntsville Space Hardware Club	University	US	2U	TBA
CHARM	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	3U	TBA
CHiRP	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	University	US	6U	TBA
CHOMPTT	University of Florida	University	US	3U	TBA
CINEMA (CubeSat for Ions, Neutrals, Electrons, & MAGnetic fields)	University of California, Berkeley	University	US	3U	2012
CINEMA-4	University of California, Berkeley	University	US	3U	TBA

Constellation Pathfinder	Boston University	University	US	1 kg	cancelled
COPPER	St. Louis University/Parks College of Engineering, Aviation & Technology	University	US	1U	2013
CP1	California Polytechnic University	University	US	1U	2006f
CP10 (ExoCube)	California Polytechnic State University	University	US	3U	TBA
CP2	California Polytechnic University	University	US	1U	2006f
CP3	California Polytechnic University	University	US	1U	2007
CP4	California Polytechnic University	University	US	1U	2007
CP5	California Polytechnic University	University	US	1U	2012
CP6	California Polytechnic University	University	US	1U	2009
CP7	California Polytechnic University	University	US	1U	TBA
CP9	California Polytechnic State University	University	US	2U	TBA
CRaBSS	NASA/ Goddard Space Flight Cente	University	US	6U	TBA
CryoCube	NASA/ Kennedy Space Center	Agency	US	3U	2014
CryoCube 2	NASA/ Kennedy Space Center	Agency	US	3U	TBA
CSIP	Air Force Research Laboratory	Military	US	3U	TBA
CSSWE (Colorado Student Space Weather Experiment)	University of Colorado	University	US	3U	2012
CSTB-1 (CubeSat TestBed 1)	Boeing	Company	US	1U	2007
CSTB-3	Boeing	Company	US	3U	TBA
CTAAP	University of North Dakota	University	US	1U	cancelled
CubeSail	University of Illinois at Urbana-Champaign	University	US	3U	TBA
CUNYSAT 1	City University of New York (CUNY)	University	US	1U	2013
CXBN (Cosmic X-ray Background Nanosatellite)	Morehead State University/Kentucky Space	University	US	2U	2012
CXBN 2	Morehead State University/Kentucky Space	University	US	2U	TBA
CySat 1	Iowa State University	University	US	1U	2017
DICE-1 (Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment)	Utah State University	University	US	1.5U	2011
DICE-2	Utah State University	University	US	1.5U	2011
DISCOSAT 1	The Discovery Museum and Planetarium	Institute	US	2U	TBA
DOSS	University of Florida Stanford University	University	US	3U	2014
Dove	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2013

Dove-2	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2013
Dove-3	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2013
Dove-4	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2013
Drag-free CubeSat	Stanford University NASA Ames	University	US	3U	idea
DragonSat 1	Drexel University	University	US	1U	2013
DUSTIE	Virginia Tech	University	US	3U	TBA
EagleSat	Embry-Riddle Aeronautical University, Prescott AZ	University	US	1U	2016
EcAMSat	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	6U	2016
EDSN 1	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 2	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 3	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 4	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 5	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 6	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 7	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
EDSN 8	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	1.5U	2014
ELFIN	University of California	University	US	3U	2015
EQUiSat	Brown University	University	US	1U	2015
ESCAPE	NASA/ Goddard Space Flight Center	Agency	US	3U	2016
ExoplanetSat	Massachusetts Institute of Technology	University	US	3U	TBA
Explorer-1 prime	Montana State University	University	US	1U	2011f
Explorer-1' U2 - HRBE	Montana State University	University	US	1U	2011
FalconSat 7	Air Force Academy	University	US	3U	2015
FIREBIRD A	Montana State University/ University of New Hampshire	University	US	1.5U	2013
FIREBIRD B	Montana State University/ University of New Hampshire	University	US	1.5U	2013
FIREBIRD C	Montana State University/ University of New Hampshire	University	US	1.5U	TBA
FIREBIRD D	Montana State University/ University of New Hampshire	University	US	1.5U	TBA
Firefly	NASA	Agency	US	3U	2013
Flock-1 1	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 10	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 11	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 12	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 13	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 14	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 15	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 16	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 17	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 18	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 19	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 2	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 20	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 21	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 22	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 23	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014

Flock-1 24	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 25	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 26	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 27	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 28	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 3	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 4	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 5	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 6	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 7	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 8	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Flock-1 9	Planet Labs Inc.	Company	US	3U	2014
Fox 1	The Radio Amateur Satellite Corporation (AMSAT)	Company	US	1U	2014
Fox 2	The Radio Amateur Satellite Corporation (AMSAT)	Company	US	1U	TBA
Funsat (Flosat)	University of Central Florida	University	US	1U	idea
GASPACS	Utah State University	University	US	1U	TBA
GE1: Golden Eagle 1	Marquette University	University	US	1U	TBA
GeneSat-1	NASA/Santa Clara University	Agency	US	3U	2006
GeneSat-2	NASA/Santa Clara University	Agency	US	3U	TBA
GLADOS	The University at Buffalo (UB)	University	US	6U	TBA
GOSTE 1	University of Hawaii at Manoa	University	US	3U	TBA
GRIFEX	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	3U	TBA
GROUP-C	STP/ Naval Research Lab	Military	US	3U	TBA
GSat	University of Florida	University	US	1U	TBA
HARP	University of Maryland	University	US	3U	2015
HawkSat-I	Hawk Institute of Space Sciences	Company	US	1U	2009
HeDI	NASA/ Goddard Space Flight Center	Agency	US	3U	TBA
Hermes	University of Colorado in Boulder	University	US	1U	2011f
Hermes 2	University of Colorado in Boulder	University	US	1U	2014
HiLITE	University of Colorado	University	US	3U	TBA
Ho'oponopono (UNP-6)	University of Hawaii at Manoa	University	US	3U	2014
Ho'oponopono 2	University of Hawaii at Manoa	University	US	3U	TBA
ICE Cube 1	Cornell University	University	US	1U	2006f
ICE Cube 2	Cornell University	University	US	1U	2006f
IceCube	NASA/ Goddard Space Flight Center	Agency	US	3U	TBA
INSPIRE-A	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	3U	2015
INSPIRE-B	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	3U	2015
IOCPS-A	The Aerospace Corporation	Non-profit	US	1.5U	2015
IOCPS-B	The Aerospace Corporation	Non-profit	US	1.5U	2015

ION	University of Illinois	University	US	2U	2006f
IPEX (CP8) (Intelligent Payload Experiment)	Jet Propulsion Laboratory	Agency	US	1U	2013
ISARA	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	3U	2014
KatySat 1	Stanford University	School	US	1U	cancelled
KickSat	Cornell University	University	US	3U	2014
Kumu A'o	University of Hawaii	University	US	1U	TBA
KUTESat	University of Kansas	University	US	1U	2006f
KySat-1	Kentucky universities	University	US	1U	2010
KySat-2	Kentucky universities	University	US	1U	2013
LAICE	University of Illinois at Urbana- Champaign	University	US	6U	TBA
LightSail-1	The Planetary Society	Non-profit	US	3U	2014
LMPC CubeSat	The Aerospace Corporation	Company	US	3U	TBA
LMRSat	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Agency	US	2U	2014
LunarSail	Aerospace Research & Engineering Systems Institute, Inc. (Ares Institute)	Non-profit	US	3U	2017
MARScom	US Naval Academy Satellite Lab	University	US	3 kg	2006
MASAT (JAK)	Santa Clara University	University	US	0.2 kg	2000
MAST	Tethers Unlimited	Company	US	3U	2007
Mayflower	Northrop Grumman and Applied Minds, LLC.	Company	US	2U	2010
M-Cubed	University of Michigan	University	US	1U	2011
M-Cubed 2	University of Michigan	University	US	1U	2013
Mea Huaka	University of Hawaii	University	US	1U	2006f
MEMS 1A	DARPA	Military	US	0.4 kg	2000
MEMS 1B	DARPA	Military	US	0.4 kg	2000
MEMS 2A	DARPA	Military	US	0.4 kg	2000
MEMS 2B (DARPA Picosat)	DARPA	Military	US	0.4 kg	2000
MEPSI 1A	DARPA	Military	US	1U	2002
MEPSI 1B	DARPA	Military	US	1U	2002
MEPSI 2A	DARPA	Military	US	1U	2006
MEPSI 2B	DARPA	Military	US	1U	2006
MEPSI 3A	DARPA	Military	US	1U	2007
MEPSI 3B	DARPA	Military	US	1U	2007
MEPSI 4A	DARPA	Military	US	1U	2007
MEPSI 4B	DARPA	Military	US	1U	2007
MEROPE	Montana State University	University	US	1U	2006f
MicroMAS-1	Massachusetts Institute of Technology	University	US	3U	2014
MinXSS	University of Colorado at Boulder	University	US	3U	TBA
MiRaTA	MIT Lincoln Laboratory	University	US	3U	TBA
MisST	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	3U	TBA
Morgana ((Meteoroid On-	Stanford University	University	US	3U	idea

orbit Research in Geospace for Advancing Near-earth Awareness))					
NanoSail-D	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	3U	2008f
NanoSail-D2	NASA/ Ames Research Center	Agency	US	3U	2010
NEUTRON 1	University of Hawaii at Manoa	University	US	3U	TBA
NMTSat	New Mexico Institute of Mining and Technology	University	US	3U	TBA
NPS-SCAT (Naval Postgraduate School Solar Cell Array Tester)	Naval Postgraduate School	University	US	1U	2013
O/OREOS	NASA Ames	Agency	US	3U	2010
OPAL	Utah State University	University	US	3U	TBA
ORS 1 ORSES	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
ORS Squared	Air Force Research Laboratory		US	6U	2014
ORS Tech 1	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
ORS Tech 2	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
OSIRIS-3U	The Pennsylvania State University	University	US	3U	2016
PATRIOT	University of Michigan	University	US	3U	TBA
PEARL	Air Force Research Laboratory	Military	US	3U	TBA
Perseus 000	Los Alamos National Laboratory	Institute	US	1.5U	2010
Perseus 001	Los Alamos National Laboratory	Institute	US	1.5U	2010
Perseus 002	Los Alamos National Laboratory	Institute	US	1.5U	2010
Perseus 003	Los Alamos National Laboratory	Institute	US	1.5U	2010
PharmaSat 1	Santa Clara University, NASA Ames Small Spacecraft Division	Agency	US	3U	2009
PhoneSat-1a	NASA Ames	Agency	US	1U	2013
PhoneSat-1b	NASA Ames	Agency	US	1U	2013
PhoneSat-2.4a	NASA Ames	Agency	US	1U	2013
PhoneSat-2.5	NASA Ames	Agency	US	1U	2014
PhoneSat-2a	NASA Ames	Agency	US	1U	2013
PolarCube	University of Colorado at Boulder	University	US	3U	TBA
PONSFD-A	Tyvak Nano-Satellites Systems and includes 406 Aerospace, Applied Defense Solutions, and California Polytechnic State University.	Company	US	3U	2015
PONSFD-B	Tyvak Nano-Satellites Systems and includes 406 Aerospace, Applied Defense Solutions, and California Polytechnic State University.	Company	US	3U	2015
PQ-Gemini++ 1	Micro-Space Inc	Company	US	0.12 kg	cancelled
PQ-Gemini++ 2	Micro-Space Inc	Company	US	0.12 kg	cancelled
PQ-Gemini++ 3	Micro-Space Inc	Company	US	0.12 kg	cancelled
PQ-Gemini++ 4	Micro-Space Inc	Company	US	0.12 kg	cancelled

PreSat (PharmaSat Risk Evaluation Satellite)	NASA Ames Research Center	Agency	US	3U	2008f
PrintSat	Montana State University	University	US	1U	2014
Prometheus 1A	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 1B	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 2A	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 2B	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 3A	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 3B	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 4A	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
Prometheus 4B	Los Alamos National Laboratory	Military	US	1.5U	2013
PropSat	Colorado Space Grant Consortium University of Colorado at Boulder	University	US	3U	TBA
Prox 1 Target	Georgia Tech	University	US	3U	2015
PSat A (ParkinsonSat A)	US Naval Academy Satellite Lab,	University	US	1.5U	TBA
PSat B (ParkinsonSat A)	US Naval Academy Satellite Lab,	University	US	1.5U	TBA
PSSCT	STP/ AFRL	Military	US	2U	TBA
PSSCT (Pico Satellite Solar Cell Testbed)	The Aerospace Corporation	Military	US	6.5 kg	2008
PSSCT-2 (Pico Satellite Solar Cell Testbed-2)	The Aerospace Corporation	Military	US	3.7 kg	2011
PTLS	STP/ Air Force Institute of Technology (AFIT)	Military	US	3U	TBA
QBScout 1	Morehead State University	University	US	PocketQub	2013
QbX-1	NRL Naval Center for Space for NRO	Military	US	3U	2010
QbX-2	NRL Naval Center for Space for NRO	Military	US	3U	2010
QuakeSat	Stanford University	University	US	3U	2003
Quest-1	Valle Christian High School	School	US	1U	2014
RACE	The University of Texas at Austin	University	US	3U	2014
RadFxSat (Fox- 1B)	Vanderbilt University and The Radio Amateur Satellite Corporation.	University	US	1U	TBA
RAFT1	US Naval Academy Satellite Lab	University	US	4 kg	2006
RAMPART	STP/AFRL	Military	US	2U	cancelled
Rascal	Saint Louis University	University	US	6U	2015
RAVAN	Johns Hopkins Applied Physics Laboratory	University	US	3U	TBA
RAX (Radio Aurora eXplorer)	SRI/University of Michigan	University	US	3U	2010
RAX-2 (Radio Aurora Explorer- 2)	SRI/University of Michigan	University	US	3U	2011
RBLE	NASA/ Goddard Space Flight Center	Agency	US	6U	TBA
RinCon 1	University of Arizona	University	US	1U	2006f

SACRED	University of Arizona	University	US	1U	2006f
SENSE (Space Environmental NanoSat Experiment)	U.S. Air Force / Boeing	Military	US	3U	2013
SENSE 2	U.S. Air Force / Boeing	Military	US	3U	2013
SKC Bisonsat	Salish Kootenai College CubeSat	University	US	1U	2014
SkyCube	Southern Stars Group, LLC	Company	US	1U	2014
SMARTsat	Texas A&M University	University	US	1U	TBA
SMDC-ONE 1 (Space & Missile Defense Command-Operational Nanosatellite Effect)	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2010
SMDC-ONE 2.1 (Able)	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2012
SMDC-ONE 2.2 (Baker)	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2012
SMDC-ONE 2.3 (Charlie)	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
SMDC-ONE 2.4 (David)	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
SMDC-ONE 2.5	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SMDC-ONE 2.6	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SMDC-ONE 2.7	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SNAP A	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SNAP B	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SNAP C	STP/ Space & Missile Defense Command	Military	US	3U	TBA
SNAPS	Stanford University	University	US	0.5 kg	TBA
Solar Blade	Carnegie Mellon University	University	US	5 kg	cancelled
Solar Power CubeSat	University of North Dakota	University	US	6U	idea
SpaceBuoy	Montana State University	University	US	3U	TBA
SPA-Trailblazer	University of New Mexico/Configurable Space Microsystems Innovations and Applications Center	University	US	1U	2013
SporeSat	NASA Ames, Purdue University, Santa Clara University	University	US	3U	2014
Stangsats	Merritt Island High School	School	US	1U	TBA
STARE A	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	3U	2012
STARE B	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	3U	2013
STARE C	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	3U	TBA
StenSat	Stensat Group, LLC	Company	US	0.2 kg	2000
STMSat-1	St. Thomas More Cathedral School	School	US	1U	TBA
SwampSat	University of Florida	University	US	1U	2013

TacSat6	Space and Missile Defense Command	Military	US	3U	2013
TechCube 1	NASA/ Goddard Space Flight Center	Agency	US	3U	2014
TechEdSat	San Jose State University	Agency	US	1U	2012
Tempo3	Mars Society	Non-profit	US	2U	cancelled
TEPCE A	STP/ Naval Research Lab	Military	US	1.5U	TBA
TEPCE B	STP/ Naval Research Lab	Military	US	1.5U	TBA
TetherSat 1	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	1.5U	TBA
TetherSat 2	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	1.5U	TBA
TINYSCOPE	STP/ Naval Postgraduate School	University	US	6U	TBA
TJ3sat	Thomas Jefferson High School for Science and Technology	School	US	1U	2013
TSAT	Taylor University	University	US	2U	TBA
TSat3	Taylor University	University	US	3U	TBA
TSat4	Taylor University	University	US	3U	2014
TU Sat 1	Taylor University	University	US	2U	2003
UCISat 1	University of California, Irvine	University	US	1U	TBA
UCISat 2	University of California, Irvine	University	US	3U	TBA
UND-Sat	University of North Dakota	University	US	1U	TBA
Unix Space Server Langley	US Naval Academy Satellite Lab,	University	US	3U	TBA
Vanguard 1	US Naval Research Lab	Military	US	1.47 kg	1958
Vermont (Lunar) Cubesat	Vermont Technical College/ University of Vermont	University	US	1U	2013
MiTEE	University of Michigan	University	US	1U	TBA
Lambdasat	San Jose State University	University	US	3U	TBA
F-1	FPT University	University	Vietnam	1U	2012
F-2	FPT University	University	Vietnam	2U	2016
PicoDragon	Vietnam National Satellite Center	Agency	Vietnam	1U	2013

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Erik Kulu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Nanosatelliitide tehnoloogia arengutrendid,

mille juhendaja on Mart Noorma,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 30.05.2014